

**Untersuchung der Einflussparameter bei der Herstellung optisch transparenter Modelle
mittels Fräsen als quasi-generativem Rapid Prototyping-Verfahren**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau der
Universität Duisburg-Essen
zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR

genehmigte Dissertation

von

Markus Hastrich
aus
Essen

Referent: Prof. Dr.-Ing. Diethard Bergers

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt

Tag der mündlichen Prüfung: 28.11.2006

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produkt Engineering, Fachgebiet für Produktionstechnologie und Produktentwicklung, der Universität Duisburg-Essen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Diethard Bergers für die Betreuung sowie die großzügige Unterstützung meiner Arbeit. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt, Fachgebiet für Fertigungstechnik der Universität Duisburg-Essen, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates sehr herzlich bedanken.

Mein besonderer Dank gilt weiter den Herren Jörg Lubnau, Jens Standke und Klaus-Dieter Werner. Hervorzuheben sei Herr Reinhard Giese. Mit seinem fachlichen Wissen im Bereich der spannenden Bearbeitung von Werkstoffen hat er wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei meiner Familie und allen, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben, ganz herzlich.

Essen, im Dezember 2006

Markus Hastrich

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Aufgabenstellung.....	1
2	Rapid Prototyping-Verfahren im Modellbau.....	6
2.1	Modellbezeichnungen.....	6
2.2	Überblick vorhandener RP-Verfahren.....	11
2.2.1	Generative RP-Verfahren	15
2.2.2	Quasi-Generative RP-Verfahren.....	17
2.3	Transparente Modelle im Modellbau	21
3	Fräsen als quasi-generatives RP-Verfahren.....	24
3.1	Grundlagen Fräsen.....	25
3.2	Konventionelles Fräsen vs. Hochgeschwindigkeitsfräsen (HSC).....	29
3.3	Problemstellungen beim Fräsen transparenter Kunststoffe	31
3.4	Transparente Kunststoffe	35
3.4.1	PMMA (Plexiglas)	35
3.4.2	PC (Makrolon).....	36
3.4.3	PETG (Simolux)	37
3.4.4	COC (Topas)	37
4	Einflussparameter auf die Transparenz.....	39
4.1	Werkstück.....	39
4.2	Werkzeug.....	40
4.3	Werkzeugmaschine	42
4.4	Schnittbedingungen	44
4.5	Bearbeitungsstrategie	45
4.6	Tabelle der Einflussparameter.....	47
5	Einsatz geeigneter NC-Softwaremoduln	48
5.1	CAD-interne NC-Programmierung	48
5.2	Einsatz von CAMWorks 2004 Plus.....	49
5.3	CAD-externe NC-Programmierung.....	52
5.4	Einsatz von Millit	53
6	Experimentelle Untersuchung der Einflussparameter.....	56
6.1	Untersuchung geeigneter Probekörper	56

6.1.1	Untersuchung von 2,5D-Formelementen mit CAMWorks.....	56
6.2	NCG - Prüfwerkstück	66
6.2.1	Untersuchung von 2,5D und 3D-Formelementen mit CAMWorks.....	67
6.2.2	Untersuchung von 2,5D und 3D-Formelementen mit Millit.....	76
6.3	Ermittlung der Rauheit.....	81
6.4	Einfluss des Werkstoffes.....	84
6.5	Ergebnisse	89
7	Anwendungsbeispiele	91
7.1	Miniaturturbine.....	91
7.2	Nasenmodell	94
7.2.1	Zielsetzung und Stand der Technik.....	94
7.2.2	Modulares Nasenmodell	97
8	Zusammenfassung und Ausblick	101
	Literatur	103

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Transparente Modelle haben im Modellbau schon immer eine bedeutende Rolle gespielt. Durch die Entwicklung und der Verwendung optischer Messverfahren [Hopkins et al. 2000] kommt dem Einsatz transparenter Modelle in der heutigen Zeit eine immer stärkere Bedeutung zu. So nutzen eine Vielzahl von Unternehmen, wie Automobil- oder Turbinenhersteller, verstärkt transparente Funktionsmodelle, um an den Motoren sowie Pumpen und Turbinen Strömungsuntersuchungen durchzuführen. Hierbei besteht für die Untersuchungen (z.B. das Überprüfen von Wirkprinzipien) sowie bei Verwendung der optischen Messtechnik (verschiedene Lasermethoden) die Notwendigkeit, dass diese Modelle aus transparenten Werkstoffen gefertigt werden. Im klassischen Modellbau wurden (und werden zum Teil heute noch) Modelle (Produktideen) nach Handskizzen größtenteils per Hand in entsprechenden Abmessungen und Werkstoffen modelliert. Je nach Komplexität der Produktkomponenten kann dies mit einem enorm hohen zeitlichen Aufwand verbunden sein (siehe Abbildung 1-1, Bilder oben).

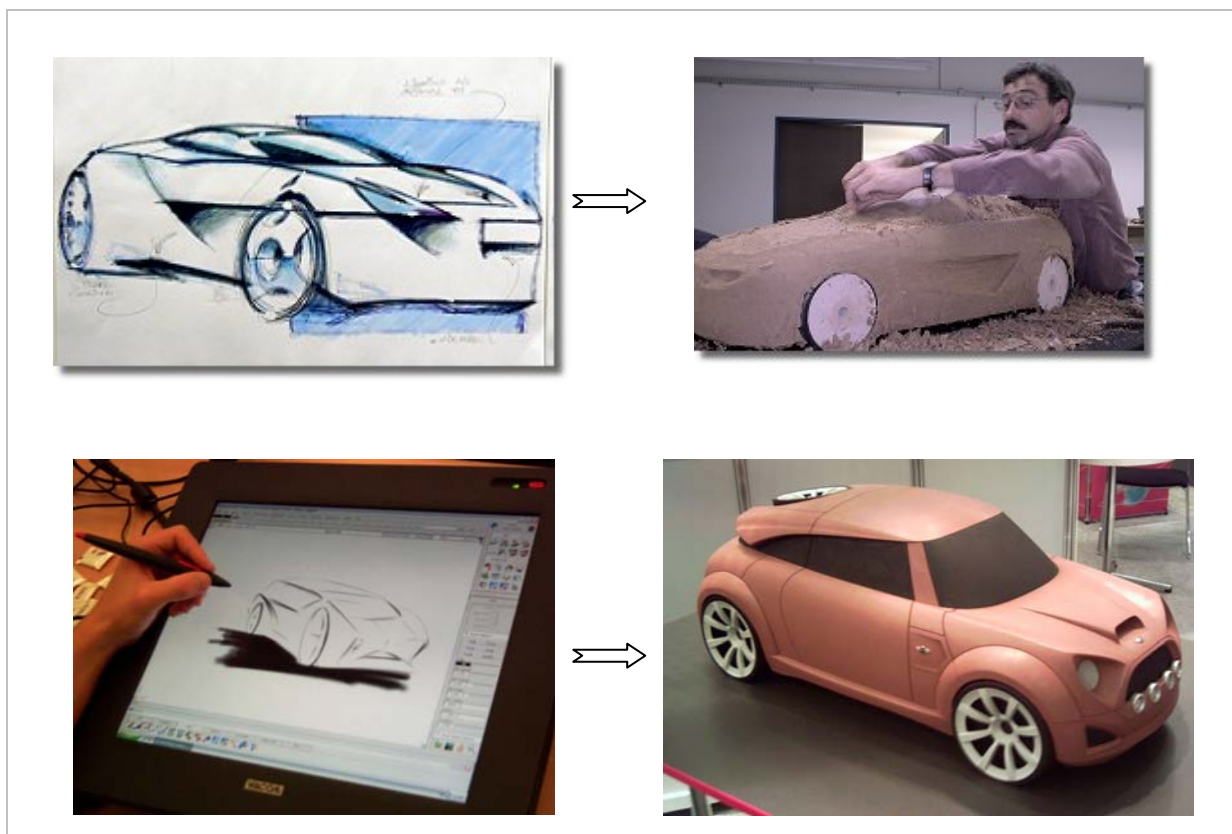


Abbildung 1-1: Modellbau früher (Bilder oben) und heute (Bilder unten)

In den letzten zwei Jahrzehnten haben sich neue Technologien entwickelt, die den Prozess der Modellherstellung automatisiert haben. Produktideen werden heute mittels Computer und entsprechender Software rechnerintern abgebildet. Die Geometrieinformationen der Bauteile können dann genutzt werden, um ein entsprechendes Bauteil mit geeigneten Fertigungstechnologien automatisiert als Modell schnell herzustellen. Dieser Prozess wird als Rapid Prototyping (RP) bezeichnet [Lennings 2000, Schindel et al. 2002].

In der Literatur werden als RP-Verfahren überwiegend die generativen Fertigungsverfahren beschrieben [Müller 2000, Grimm 2002, Gebhardt 2003, Wohlers 2005]. Generativ bedeutet, dass die Bauteile schichtweise durch Materialaufbau entstehen. Je nach Verfahren wird flüssiges Monomer polymerisiert, pulverförmiges Material gesintert, Bauteile durch Auftragen von Thermoplasten oder durch das Laminieren von Papier- bzw. Kunststofffolien hergestellt. Durch den schichtweisen Aufbau der Bauteile lassen sich insbesondere auch komplexe Geometrien herstellen. Voraussetzung für diesen Herstellungsprozess ist die vollständige rechnerinterne Abbildung der Bauteilgeometrie.

Die Nutzung der generativen RP-Verfahren zum Herstellen transparenter Modelle ist allerdings nicht möglich, da ein wesentlicher Nachteil dieser Verfahren die begrenzte Werkstoffvielfalt ist. Die Stereolithographie nutzt als einziges generatives RP-Verfahren neben Standardpolymeren auch neu entwickelte Kunstharze [DSM 2001], allerdings sind die eingesetzten Harze im festen Aggregatzustand nur teiltransparent. Der Einsatz solcher Bauteile für z.B. fluidmechanische Untersuchungen, insbesondere bei optischen Messverfahren, beschränkt sich daher auf wenige Anwendungen. Zudem ist ein Finishing z.T. nicht möglich, da Bereiche der Geometrie nicht zugänglich sind [DeGaspari 2002].

Den generativen RP-Verfahren stehen die konventionellen Fertigungsverfahren, die eine Bauteilfertigung durch Abtrag von Material erreichen, gegenüber. So gehört das Fräsen zu den weit verbreiteten konventionellen Fertigungsverfahren. Durch das Fräsen lassen sich unterschiedliche, transparente Werkstoffe (speziell Kunststoffe) bearbeiten, um ein gewünschtes Modell herzustellen. Vorteil des Fräsens ist dabei nicht nur die Materialvielfalt, sondern auch der mögliche schichtweise Aufbau eines Modells mit anschließendem Fügen (siehe Kapitel 2). Da komplexe Geometrien nicht immer aus einem Werkstück herausgearbeitet werden können, wird die Geometrie virtuell in Schichten geschnitten, die Schichten separat gefertigt und mit entsprechenden Fügeverfahren zu einem Bauteil gefügt. Bei reversibler Fügetechnik können bei Bedarf zudem einzelne Schichten (Moduln) getauscht werden, ohne ein vollständig neues Modell herzustellen.

Durch den schichtweisen Aufbau könnten weiterhin gezielt Messinstrumente in den Schichten platziert und gegebenenfalls getauscht werden. Damit wird eine Überfrachtung des Modells mit Sensoren vermieden. Eine Auslegung nach dem Baukastenprinzip ist ein wesentlicher Vorteil, vor allem im Bezug auf die Wirtschaftlichkeit. Wenn möglich, sollten Varianten nur durch das Hinzufügen oder Entfernen von einzelnen Komponenten erreicht werden [Müller 2002].

Mittlerweile wird in der Literatur auch das Fräsen als RP-Verfahren verstanden [Lennings 1999, Zhuo u. He 2004], da Rapid Prototyping nach Auffassung der Autoren allgemein ein automatisierter Herstellungsprozess ist, welcher ein reales Modell aus einem dreidimensionalen Computermodell (3D-CAD¹) in einer kurzen Zeit herstellt. Die sich daraus ergebenden Resultate lassen sich durch eine rechnerinterne Darstellung (3D-CAD) der Produktkomponenten und durch Simulation z.B. Festigkeitsüberprüfung mittels der Finite Elemente Methode (FEM), nur zum Teil ableiten [Spur und Krause 1997].

Beim spanenden Bearbeiten von transparenten Kunststoffen ist eine Vielzahl von Parametern zu beachten, die einen wesentlichen Einfluss auf die Transparenz besitzen. Zwar werden einige Richtwerte in der Fachliteratur bereitgestellt, diese können allerdings lediglich als grobe Anhaltswerte verstanden werden, so dass es für die Bearbeitung von transparenten Kunststoffen unumgänglich ist, ein eigenes Erfahrungswissen aufzubauen. Die in der Literatur beschriebenen Hinweise weichen speziell in den Schnittparametern stark voneinander ab und berücksichtigen zudem nicht den Einfluss geeigneter Bearbeitungs- und Frässtrategien. Nach Angaben einzelner Unternehmen und Autoren sind eigene Versuche unerlässlich [Lennings 2000, CNC-Modellbau 2005, Klueh 2005], ein Wissenstransfer findet nicht statt. Eine wissenschaftliche Grundlage zum Fräsen von transparenten Kunststoffen, die diese Einflussgrößen gleichzeitig berücksichtigen, liegt bis heute nicht vor.

¹ CAD = Computer Aided Design



Abbildung 1-2: Modell durch Fräsen (links) u. Stereolithographie (rechts)

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung der maschinellen Einflussparameter beim Fräsen von transparenten Kunststoffen, sowie des Einflusses unterschiedlicher Bearbeitungs- und Frässtrategien auf die Transparenz der Werkstoffe. Im Hinblick auf eine breite Anwendbarkeit der Ergebnisse beziehen sich die zu entwickelnden Ansätze auf den Einsatz von 3-Achs-Bearbeitungszentren, deren Leistungsspektrum in der Drehzahl beschränkt ist. Eine erweiterte Anwendung der Ansätze auf Bearbeitungszentren mit höherer Drehzahl und auf 5-Achs-Maschinen ist dabei grundsätzlich gegeben und beabsichtigt. Die Untersuchungen werden mit den transparenten Kunststoffen Plexiglas (PMMA²) und Makrolon (PC³) durchgeführt. Es werden die für eine optimierte Transparenz wichtigen Problemstellungen herausgearbeitet und entsprechende Lösungsvorschläge entwickelt. Neben den rein fertigungstechnischen Gesichtspunkten steht die Einbeziehung der datentechnischen Zusammenhänge zwischen Datenlieferant und der Fertigung im Fokus der Untersuchungen.

Grundlage für den Einsatz der Rapid Prototyping-Verfahren sind im Allgemeinen 3D-CAD-Daten. Diese Volumendaten werden mit entsprechender Software aufbereitet und anschließend als Fertigungsinformation für das jeweilige RP-Verfahren genutzt. Darüber hinaus steigt aber auch im medizinischen Bereich das Verlangen nach Modellen, die zur Operationsplanung dienen. Grundlage für diese Modelle sind die bildgebenden Verfahren. Die bei einer Computertomogra-

² Polymethylmethacrylat

³ Polycarbonat

phie (CT) entstehenden CT-Bilder können durch Interpolation in ein Volumenmodell umgewandelt und dieses anschließend gefertigt werden. Für spezielle Untersuchungen sind auch hier verstärkt transparente Modelle von Interesse, die als Funktionsmodell für Strömungsuntersuchungen genutzt werden können. Die Wirksamkeit der entwickelten Ansätze wird in der vorliegenden Arbeit anhand von Praxisbeispielen aus dem Maschinenbau und der Medizin dargestellt.

Zur Fundierung der entwickelten Ansätze werden in Kapitel 2 die vorhandenen RP-Verfahren hinsichtlich der Einsatzmöglichkeiten vorgestellt. Weiterhin erfolgt eine Unterteilung in generative und quasi-generative RP-Verfahren. In Kapitel 3 werden aufbauend auf den Grundlagen des Fräsens die Problemstellungen beim Spanen von Kunststoffen aufgezeigt sowie transparente Kunststoffe als Einsatzwerkstoffe vorgestellt. Um die wesentlichen Einflussparameter auf die Transparenz zu dokumentieren, werden in Kapitel 4 die Einflussgrößen in fünf Gruppen eingeteilt. Die für die experimentelle Untersuchung wichtigen Parameter werden um den datentechnischen Zusammenhang der Prozesskette ergänzt, welcher in Kapitel 5 beschrieben wird. Der Einsatz des verwendeten Moduls zur Erzeugung der Werkzeugwege hat wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis und ist daher ebenso Bestandteil der experimentellen Untersuchungen, welche in Kapitel 6 beschrieben werden. Die praktische Anwendung der Ergebnisse anhand von Praxisbeispielen wird dann in Kapitel 7 dargestellt, eine Zusammenfassung der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 8.

2 Rapid Prototyping-Verfahren im Modellbau

Im Laufe der Entwicklung eines Produktes ist häufig die Erstellung von Modellen und Prototypen zu Anschauungs- und Funktionszwecken notwendig. Dies ermöglicht die Begutachtung des Bauteils schon im Vorfeld der Produktion und hilft Fehler frühzeitig zu erkennen und zu beseitigen. Eine schnelle und kostengünstige Möglichkeit stellen hier die verschiedenen Rapid Prototyping-Verfahren dar, welche die automatisierte Erstellung von realen Modellen in kürzester Zeit aus Volumendaten ermöglichen [Ehrlenspiel 2003].

2.1 Modellbezeichnungen

Eine einheitliche Sprachregelung der Begriffe Modelle und Prototypen ist bis heute nicht gefunden. Zur Beschreibung von Modellen haben sich in der Praxis zwei Gruppen etabliert. Der Verband der Deutschen Industrie Designer (VDID) [VDID 2004] hat die unterschiedlichen Modelltypen in sechs Klassen unterteilt:

- Proportionsmodell
- Ergonomiemodell
- Designmodell
- Funktionsmodell
- Prototyp
- Muster

Die Unterschiede zwischen den einzelnen Modelltypen sind teilweise sehr gering, so dass nach einem Vorschlag der NC-Gesellschaft [NCG 2004] die Modelltypen in vier Modellarten zusammengefasst worden sind:

- Konzeptmodelle
- Geometrieprototypen
- Funktionsprototypen

➤ Technische Prototypen

Konzeptmodelle (Anschauungsmodelle) werden für die Überprüfung von Proportionen und des Designs eines Teils eingesetzt. Es sollen dadurch grundlegende Fehler im Design und Aufbau des Produktes in einem frühen Stadium der Entwicklung erkannt werden. Diese Fehler würden ansonsten frühestens bei der Fertigung der Prototypen erkannt werden. Der Rückschritt in die Konstruktionsphase würde eine große Verzögerung bei der Fertigstellung des Produktes bedeuten und beträchtliche Kosten sowie Verluste durch Verzögerung der Markteinführung verursachen. Aufgaben sind daher:

- Überprüfung der Proportionen
- Überprüfung des Designs
- Validierung des 3D-CAD-Modells

Geometrieprototypen werden vor allem für interne Kommunikation, Kundenpräsentationen und Marktstudien verwendet. Es kann damit z.B. überprüft werden, ob für ein Produkt überhaupt ein Markt besteht oder das Design als ansprechend empfunden wird. Des Weiteren wird dem Kunden ein besseres Bild vom endgültigen Produkt vermittelt (Farbe, Rundungen, Oberflächenqualität oder Glanz etc.). Damit können Missverständnisse zwischen Anbieter und Kunde vermieden werden, die in einer späteren Entwicklungsphase nur schwer zu beheben wären. Dazu zählt auch Optik, Zugänglichkeit und Bedienbarkeit (Ergonomie). Im internen Bereich eines Unternehmens ermöglicht der Prototyp eine bessere Verständigung zwischen den einzelnen Abteilungen bzw. Zulieferern. Aufgaben sind:

- Interne Kommunikation
- Kundenpräsentationen
- Marktstudien

Funktionsprototypen werden z.B. zur Überprüfung der Funktionalität vor allem im Versuchswesen eingesetzt. Es soll damit ausgeschlossen werden, dass ein grundlegender Fehler im Wirkprinzip vorliegt. Durch Versuche an Funktionsprototypen sollen die Eigenschaften des Produktes ermittelt werden. Es erfolgt damit eine Überprüfung, ob das Produkt die im Entwurf festgelegten Eigenschaften besitzt, bevor teure Prototypen oder gar Produktionsmittel erstellt werden.

Aufgaben sind daher z.B.:

- Festigkeitsprüfung
- Verifikation der Wirkprinzipien
- Strömungsmechanische Untersuchungen

Der *technische Prototyp* ist ein funktionsfähiges Gerät mit allen geplanten Bauteilen. Es entspricht in Form und Funktion dem späteren Serienmuster. Hierbei erfolgt die komplette Darstellung und Überprüfung der Funktion sowie ein Design-Check. Der Prototyp dient der Fertigung, der Beschaffung und dem Marketing zur Betriebsmittelplanung, zur Herstellbarkeits- und Montageüberprüfung und als Kommunikationsmittel/Präsentationsmittel für interne (Entwickler, Vertrieb) und externe Stellen (Kunden). Daher sind seine Aufgaben:

- Überprüfung der Montage u. der Fertigungszeichnungen
- Verifikation aller Wirkprinzipien
- Betriebsmittelplanung

Im Folgenden werden für den weiteren Verlauf der Arbeit die Begriffe **Anschauungsmodell** sowie **Funktionsmodell** genutzt werden. Aus den Ausführungen zu den Begriffen ist ersichtlich, dass in jedem Stadium der Produktentwicklung bestimmte Anforderungen an ein Produkt gegeben sind. Damit ergibt sich in jeder Projektphase ein Bedarf für Modelle, um diesen Anforderungen gerecht zu werden. Zum einen können dies die physischen Modelle sein, auf der anderen Seite verstärken aber auch virtuelle Darstellungen wesentlich die Entscheidungsfindung [Zhu u. Xu 2003]. Unter dem Begriff des Virtual Prototyping werden dabei alle Methoden verstanden, die eine digitale Überprüfung von Produkt- und Prozesseigenschaften ermöglichen.

Ausgangsbasis zur Herstellung von physischen oder virtuellen Anschauungs- und Funktionsmodellen sind vorwiegend 3D-CAD-Daten des herzustellenden Bauteils. Ausgangspunkt kann auch eine einfache Handskizze oder eine 2D-Zeichnung sein (siehe Abbildung 2-1). Um jedoch die Technologien des Rapid Prototyping einsetzen zu können, müssen hieraus immer zuerst 3D-CAD-Daten erstellt werden. Die 3D-Daten werden anschließend zunächst rechnerintern in einzelne Schichten zerlegt. Diese Schichten dienen den unterschiedlichen RP-Verfahren als Fertigungsinformation [Bergers 2005].

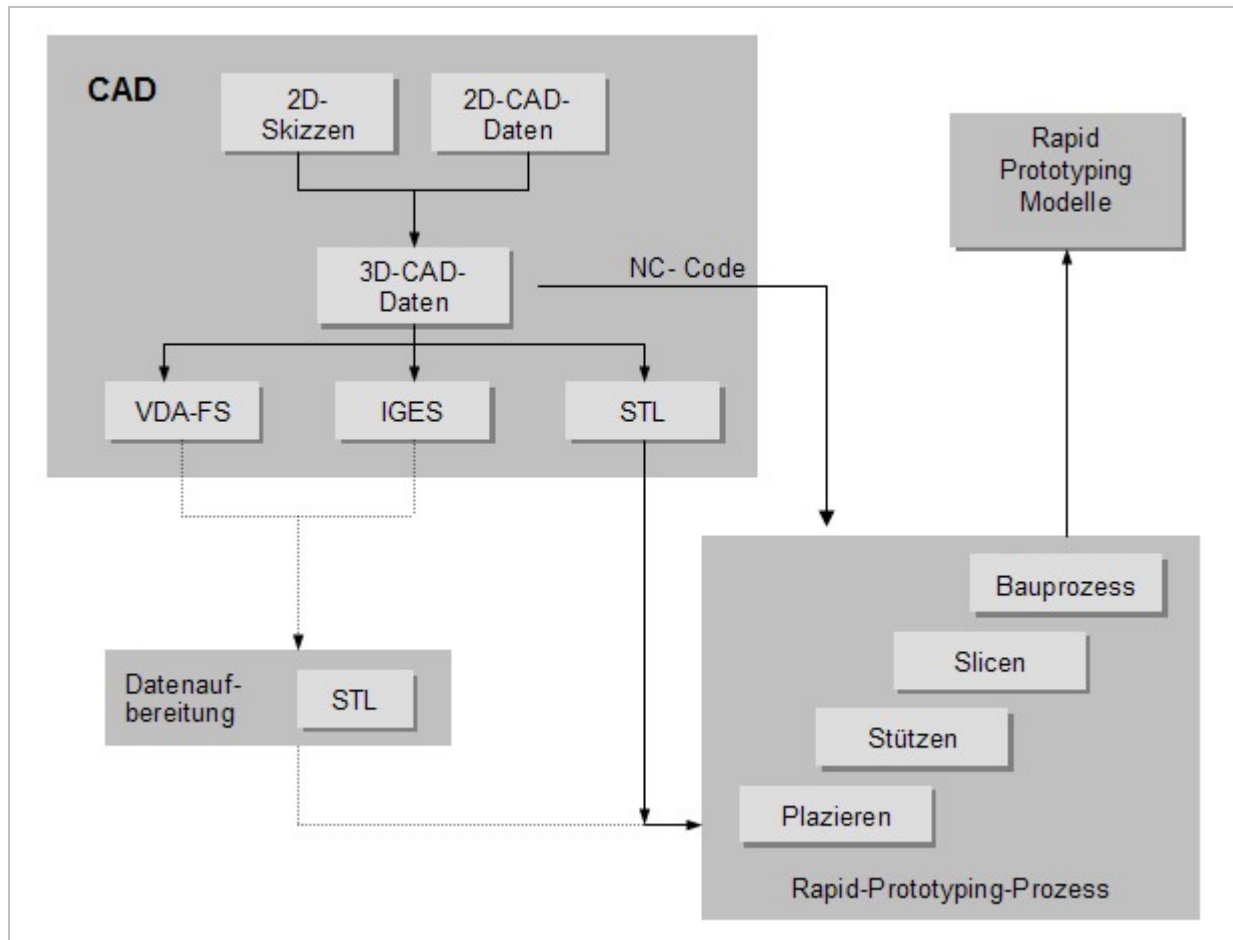


Abbildung 2-1: Verfahrensschema RP-Prozess

Die Volumendaten, unabhängig vom CAD-System, werden größtenteils mittels der standardisierten STL-Schnittstelle exportiert. Es können auch andere Flächenschnittstellen wie IGES, VDA-FS, DXF oder STEP etc. eingesetzt werden. Für die Folgesoftware können diese Flächendaten ebenfalls in das STL-Format konvertiert werden. Die Kürzel der einzelnen Schnittstellen stehen für folgende Begriffe:

STL: Standard Transformation Language

Entstand als Format zur ersten industriell gefertigten Stereolithographiemaschine. De facto Industriestandardformat, allerdings nicht genormt.

VDA-FS: Verband Deutscher Automobilhersteller Flächenschnittstelle

Systemneutrales Format, definiert und entwickelt von der Automobilindustrie zur Übertragung von 3D-Geometriedaten zwischen unterschiedlichen CAD-Systemen, insbesondere für komplexe Freiformflächen.

IGES: Initial Graphics Exchange Specification

Datensatz-Format für grafische/geometrische Modelle und Zeichnungen. Es ermöglicht ebenfalls den Datenaustausch zwischen unterschiedlichen CAD-Systemen.

STEP: Standard for the Exchange of Product Model Data

Internationale Norm für den Austausch geometrischer und anderer Produkt-Modelldaten zwischen unterschiedlichen CAD-Systemen.

DXF: Drawing Exchange Files

Datenformat, das von der Firma AUTODESK mit dem Ziel entwickelt wurde, die Übertragung von Zeichnungsinhalten zwischen dem PC-orientierten CAD-System AUTOCAD und anderen Programmen zu gewährleisten.

Das Volumenmodell wird zunächst per Triangulation in das STL-Format umgewandelt. Triangulation bedeutet hierbei, dass alle Außenflächen mit Dreiecken belegt werden. Diese Dreiecke enthalten neben den drei Eckpunkten auch einen Normalenvektor, der vom Volumen des Bauteils weg zeigt. Durch die Gesamtzahl der Dreiecke mit Normalenvektor bleibt die Volumeninformation erhalten. Wie in nachfolgender Abbildung 2-2 zu erkennen ist, hängt die Qualität der zur fertigenden Geometrie davon ab, in welcher Qualität das Bauteil gespeichert wird. Dies hat wiederum Einfluss auf die Datengröße des erzeugten STL-Datensatzes. Hier ist vom Anwender jeweils ein Optimum (maximale Genauigkeit vs. minimale Dateigröße) zu finden.

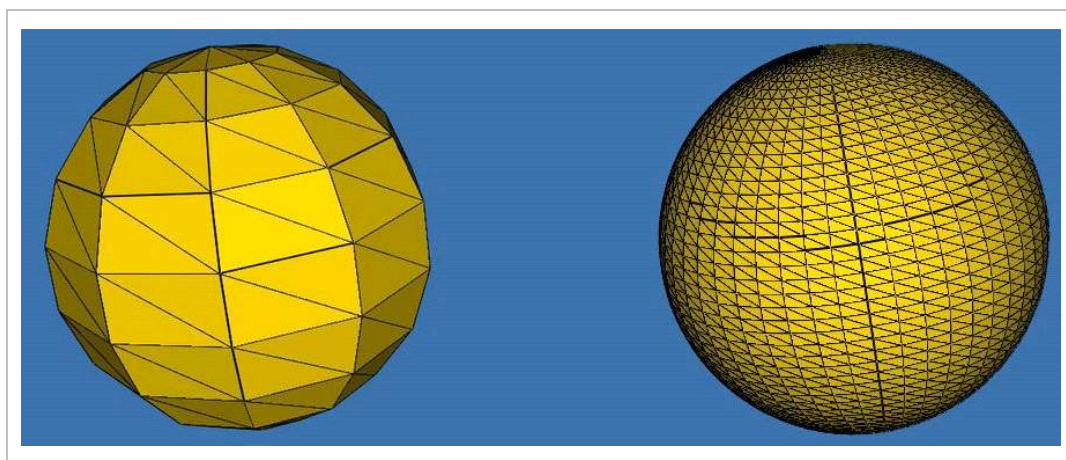


Abbildung 2-2: Kugel mit 160 Dreiecken (links); Kugel mit 4800 Dreiecken (rechts)

Im nächsten Schritt werden die Bauteildaten mit Hilfe einer Software im Bauraum der RP-Maschine orientiert. Je nach RP-Verfahren wird eine Stützkonstruktion erzeugt, damit das Bauteil im Bauraum stabil ausgerichtet bleibt. Die Daten werden im Anschluss von der Software automatisch in einzelne Schichten zerlegt. Diese Schichten enthalten zum einen die Konturinformation der einzelnen Schicht und zum anderen Informationen, wo sich Bauteilvolumina befinden. Diese Schichtdaten bilden dann die Fertigungsinformationen der unterschiedlichen RP-Verfahren. Nach Beendigung des Fertigungsprozesses müssen die Bauteile in der Regel manuell nachgearbeitet werden. Benötigt ein Unternehmen mehrere Modelle oder spezifische Materialeigenschaften, so können unterschiedliche Folgetechnologien wie Lackieren, Beschichten, Abformen oder Abgießen etc. nachgeschaltet werden.

Zur Fertigung von Modellen können nicht nur 3D-CAD-Systeme als Datenlieferant, sondern auch die Technik des Reverse Engineering sowie die bildgebenden Verfahren (medizinische Bilddaten) genutzt werden. Beim Reverse Engineering werden vorhandene physische Objekte in ihrer geometrischen Struktur erfasst und in ein rechnerinternes Datenmodell überführt. Dazu gehören das Scannen des Objektes, die Erfassung der räumlichen Gestalt in Form von Punktwolken sowie die abschließende, als Flächenrückführung bezeichnete Datenaufbereitung.

Bei den bildgebenden Verfahren (z.B. Computertomographie) werden die einzelnen Schichtaufnahmen mittels Interpolation im Rechner zu einem Volumendatensatz zusammengefügt. Dieses Modell kann nun als STL-Format exportiert und durch ein entsprechendes RP-Verfahren gefertigt werden. Für die Operationsplanung werden somit detailgetreue Modelle bestimmter Knochen oder Weichteile wiedergegeben (siehe Kapitel 7.2).

2.2 Überblick vorhandener RP-Verfahren

Zu den Hauptanwendern der RP-Verfahren gehören [Jaeger et al. 2003, Wohlers 2005] die Automobilzulieferindustrie, der Fahrzeugbau, Unternehmen, die Konsumprodukte herstellen, Luft- und Raumfahrt, die Kommunikationstechnik sowie Maschinenbauunternehmen und Militär. Dabei werden 75 % aller RP-Verfahren in allen Phasen der Produktentwicklung eingesetzt. In einer Studie [Nursanto 2002] hat sich gezeigt, dass die Beurteilung des Nutzens der Anwendung der Rapid Prototyping-Verfahren zur Herstellung von Funktionsmodellen in den frühen Phasen von 80 % der Unternehmen mit hohem und sehr hohem Nutzen bewertet wird.

Eine mögliche Unterteilung der vorhandenen Rapid Prototyping-Verfahren kann unter Klassifizierung nach dem Aggregatzustand durchgeführt werden. Nachfolgend seien in der Abbildung 2-3 die beschriebenen Rapid Prototyping-Verfahren nach Ausgangsmaterialien aufgeführt [Müller 2000, Gebhardt 2003]. Es gibt kein universell einsetzbares Rapid Prototyping-Verfahren. Für jeden Anwendungsfall muss das geeignete Verfahren bestimmt werden [Hastrich 2000].

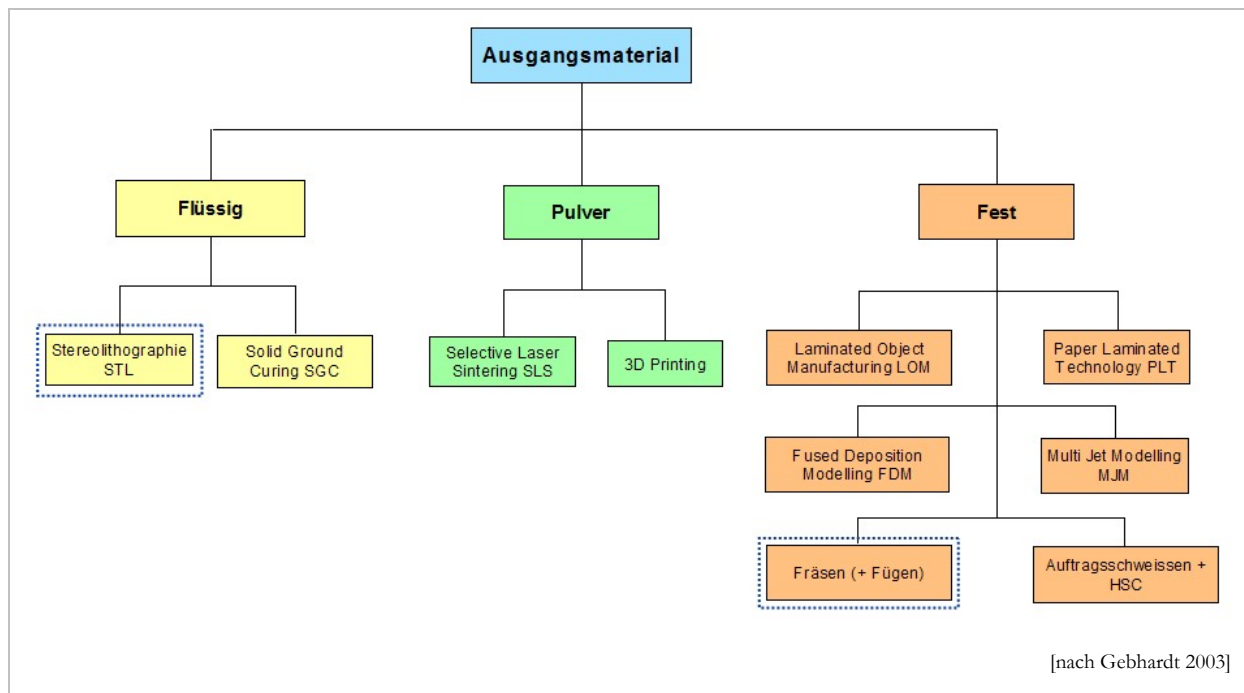


Abbildung 2-3: RP-Verfahren klassifiziert nach Aggregatzustand

Bei der Auswahl eines Verfahrens müssen folgende Kriterien berücksichtigt werden:

- Genauigkeit
- Detaillierung
- Oberflächengüte
- Material
- Abmessungen
- mechanisch-technologische Eigenschaften
- Verwendungszweck
- Folgeverfahren

- Bauzeit
- Kosten
- Lokale Austauschbarkeit

Rapid Tooling und Rapid Manufacturing sind Begriffe im Rapid Prototyping-Umfeld, die meist als Folgeverfahren im Anschluss an Rapid Prototyping-Verfahren angewandt werden. Unter Rapid Tooling wird verstanden, wenn unter Einsatz von schnellen, modernen Methoden erste Werkzeuge und Formen zur Herstellung von Prototypen und Vorserien produziert werden (z.B. Gieß- oder Spritzformen). Dabei können RP-Verfahren genauso herangezogen werden wie auch das Hochgeschwindigkeitsfräsen (HSC). Ziel ist es, schnellstmöglich und kostengünstig eine meistens geringe Stückzahl von Bauteilen im Original-Werkstoff herzustellen. Mit RP-Methoden ist dies im Normalfall nicht möglich. Unter Rapid Manufacturing werden RP-Anwendungen verstanden, die Produkte mit Seriencharakter erzeugen [Levy et al. 2003].

Im Folgenden sollen die RP-Verfahren unter funktionalen Gesichtspunkten betrachtet und eingeteilt werden. Die Fertigung eines Modells mittels der Rapid Prototyping-Verfahren kann dabei in folgende drei Prozessschritte unterteilt werden (Abbildung 2-4):

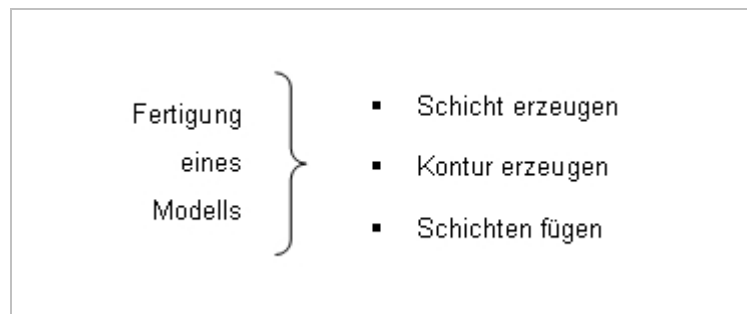


Abbildung 2-4: Prozessschritte beim Rapid Prototyping

Diese grundlegenden Funktionen können sowohl in unterschiedlicher chronologischer Reihenfolge als auch in einem simultanen Ablauf aller drei Schritte auftreten. Die Anzahl an Fertigungsschritten kann als Maß für die Generativität von Fertigungsverfahren und damit auch der RP-Verfahren herangezogen werden. Die Zuordnung der Verfahren in quasi oder quasi-generativer Verfahren, die Anzahl der in Abbildung 2-4 beschriebenen Arbeitsschritte sowie der verwendeten Materialien sind in Tabelle 2-1 zusammenfassend dargestellt [Assmann 2003].

Bei den einschrittigen Verfahren sind alle Anforderungen an rein generative Fertigungsverfahren erfüllt. Ein klassisches Beispiel für ein einschrittiges RP-Verfahren ist die Stereolithographie. Bei zwei- und dreischrittigen Verfahren erfolgen die einzelnen Schritte während der Fertigung sequenziell. Aufgrund des hohen Automatisierungsgrades dieser Verfahren ist jedoch häufig kein Eingriff seitens der Anwender notwendig.

RP-Verfahren	1-Schritt-Verfahren	2-Schritt-Verfahren	3-Schritt-Verfahren	Art	Materialien
Stereolithographie (STL)	x			generativ	Epoxid- und Acrylharze
Solid Ground Curing (SGC)	x				Photopolymere
Selektives Lasersintern (SLS)	x				Kunststoffe (PA), Metalle, Sande, Keramiken
3D-Printing	x				Kunststoffe, Metalle, Keramiken
Fused Deposition Modelling (FDM)	x				Kunststoffe (ABS), Thermoplaste
Multi Jet Modelling (MJM)	x				Kunststoffe (ABS), Thermoplaste
Control Metal Build-Up (CMB)		x		quasi generativ	Spanbare Metalle
Layer Object Manufacturing (LOM)			x		Papier, Kunststoffe (Folien)
Fräsen			x		Alle spanbaren Materialien

Tabelle 2-1: Klassifizierung der RP-Verfahren

Im Ergebnis sind für den Anwender bei diesen RP-Verfahren keine Unterschiede zu den einschrittigen Verfahren feststellbar, so dass diese Fertigungsverfahren als quasi-generativ bezeichnet werden können [Assmann 2003]. Zu den zweischrittigen Verfahren zählt das Controlled Metal Build-Up (CMB – Auftragsschweißen u. Hochgeschwindigkeitsfräsen). Unter den oben getroffenen Aussagen zur Generativität von RP-Verfahren lässt sich das Layer Lamine Manufacturing (LLM), hier vertreten durch das Layer Object Manufacturing (LOM), als dreischrittiges Verfahren den quasi-generativen RP-Verfahren zuordnen. Dieses Verfahren wird häufig den generativen RP-Verfahren zugeordnet, was letztlich die uneinheitliche Klassifizierung der RP-Verfahren nochmals unterstreicht. Unter der Voraussetzung eines schichtweise aufgebauten Bauteils soll die Fertigung von Bauteilen mittels Fräsen in der vorliegenden Arbeit als quasi-generativ bezeichnet werden.

Zum besseren Verständnis der Funktionsweisen der in Tabelle 2-1 aufgeführten RP-Verfahren werden beispielhaft und stellvertretend für die Art der RP-Verfahren im Folgenden die Stereolithographie (STL), das Controlled Metal Build-Up (CMB) sowie das Layer Object Manufacturing (LOM) und das Fräsen beschrieben.

2.2.1 Generative RP-Verfahren

Stereolithographie (STL)

Die Technologie des Rapid Prototyping wurde mit der Stereolithographie 1987 weltweit erstmals vorgestellt. Grundgedanke des einschränkenden Verfahrens war und ist die Reduzierung eines komplexen dreidimensionalen Fertigungsproblems auf eine große Anzahl einfacher zweidimensionaler Fertigungsschritte. Die Grundkomponenten einer Stereolithographiemaschine sind eine Bauplattform, eine Wischvorrichtung, ein UV-Laser, ein Spiegelgalvanometer und ein Behälter (siehe Abbildung 2-5). Das Modell wird auf der Bauteilplattform aufgebaut. Dazu härtet der UV-Laser die Bauteilgeometrie Punktweise auf der Harzoberfläche aus. Dieser Vorgang wird als Photopolymerisation bezeichnet. Der Laser wird dabei durch ein computergesteuertes Spiegelgalvanometer geführt. Nach der Belichtung einer Schicht wird die Bauteilplattform um eine Schichtdicke in den Harzbehälter abgesenkt.

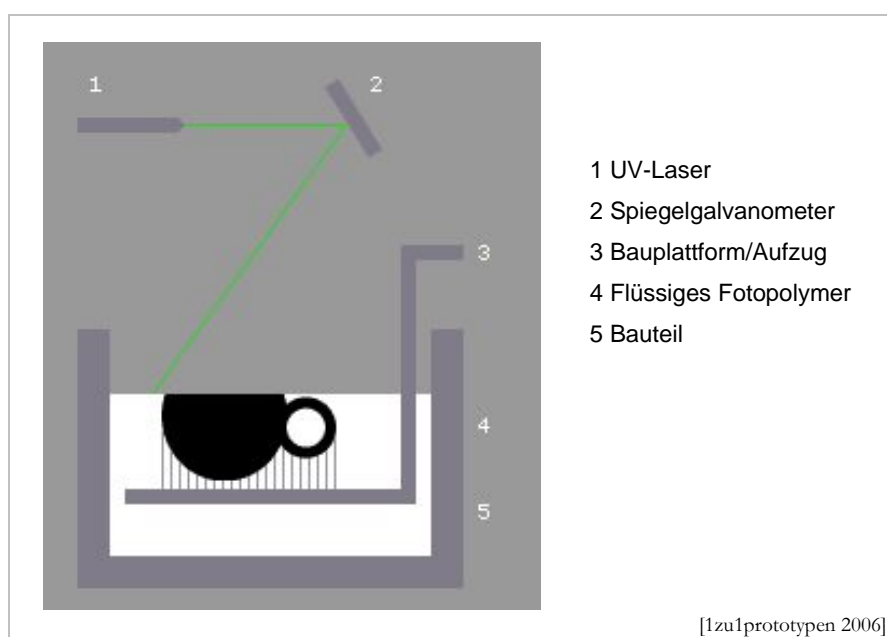


Abbildung 2-5: Verfahrensprinzip Stereolithographie

Durch den Wischermechanismus erfolgen der Neuauftrag des Photopolymers und die Glättung der Harzoberfläche. Übliche Schichtstärken betragen 0,1 bis 0,2 mm. Die Belichtung des Photopolymers während des Bauprozesses erfolgt nicht vollständig, so dass eine nachträgliche Aushärtung des Bauteils in einem UV-Schrank erforderlich ist. Die Hauptvorteile der Stereolithographie liegen in der nahezu unbeschränkten Komplexität der Teilegeometrie und in der hohen Detaildarstellung im Vergleich zu den anderen RP-Verfahren. Allerdings beschränkt sich die Werkstoffauswahl ausschließlich auf den Einsatz von Photopolymerharzen. Bauteile aus serienähnlichen Thermoplasten sind nicht herzustellen. Aufwendig ist das Preprocessing mit der Berücksichtigung der Stützkonstruktion. Sie ist ebenfalls dafür verantwortlich, dass sich mehrere Bauteile nur nebeneinander und nicht auch übereinander im Arbeitsraum befinden können.



Abbildung 2-6: Beispiele der Stereolithographie

Die Stereolithographie ist von 3D-Systemen für die schnelle Herstellung von hochpräzisen Prototypen entwickelt worden. Die mit diesem Verfahren produzierten Teile zeichnen sich durch hohe Präzision und Qualität sowie hervorragende Oberflächeneigenschaften aus. Allerdings sind diese Teile nur teiltransparent. Die Stereolithographie ist ein geeignetes Rapid Prototyping-Verfahren, um genaue, robuste Modelle, Feingussformen und Werkzeuge für die Kleinserienfertigung zu erzeugen [Gebhardt 2003].

2.2.2 Quasi-Generative RP-Verfahren

Controlled Metal Build-Up (CMB)

Das zweischrittige Verfahren CMB wurde am Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie (IPT) entwickelt und ermöglicht durch die integrierte Verwendung von Laserauftragsschweißen und Hochgeschwindigkeitsfräsen (HSC) den schichtweisen Aufbau von Metallen (Abbildung 2-7). Vorwiegend findet dieses Verfahren Anwendung in der Änderung oder Reparatur von Werkzeugen oder Gesenken.



Abbildung 2-7: Verfahrensprinzip Controlled Metal Build-Up

Der Verfahrensablauf erfolgt in den zwei Prozessschritten:

1. Auftragsschweißen von Material auf einem definierten Querschnitt
(Grobschicht erzeugen und Fügen)
2. Plan- und Konturfräsen der aufgeschweißten Schicht
(Feinschicht und Kontur erzeugen)

Im Hinblick auf die erreichbare Genauigkeit und Oberflächenqualität kann dieses Verfahren als vorteilhaft eingestuft werden. Wie auch bei anderen RP-Verfahren kann jedoch auch bei diesem

Verfahren bei der Fertigung von Bauteilen mit Hinterschneidungen auf geeignete Stützkonstruktionen nicht verzichtet werden.

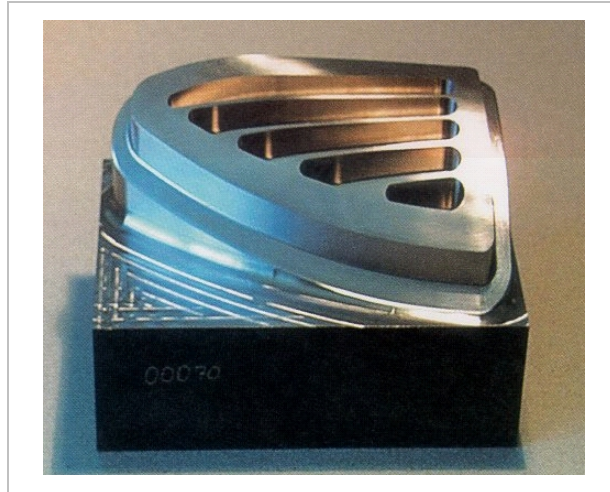


Abbildung 2-8: Beispiel Controlled Metal Build-Up

Layer Object Manufacturing (LOM)

Das Layer Object Manufacturing als dreischrittiges Verfahren wird durch die Prozessschritte *Schicht erzeugen – Fügen – Kontur erzeugen* gekennzeichnet. Hier liegt der Werkstoff in Form einer einseitig mit Heißschmelzkleber beschichteten Papier- oder Kunststoffolie vor. Die Folienstärken variieren zwischen 0,1 - 0,2 mm. Der Rechner erzeugt die Querschnittsflächen entsprechend der jeweiligen Folienstärke. Eine beheizte Rolle drückt und verklebt die erste Folienlage auf die in Z-Richtung absenkbare Arbeitsplattform (Abbildung 2-9). Danach fährt ein Laserstrahl die Außenkonturen ab und schneidet die Querschnittsfläche gemäß dem Datensatz aus. Beidseits der Arbeitsplattform sind Wickeleinrichtungen angebracht. Die Materialzufuhr erfolgt, indem links der Plattform der Rest der Folienbahn aufgewickelt wird und sich neue Folie von der rechts angebrachten Vorratsfolie abwickelt. Ist die letzte Querschnittsfläche aufgebracht, ist der Prozess beendet. Es ist ein Block entstanden, in dem das hergestellte Objekt stützend eingebettet ist. Dieser wird aus der Maschine entnommen und das Objekt aus dem Block herausgelöst.

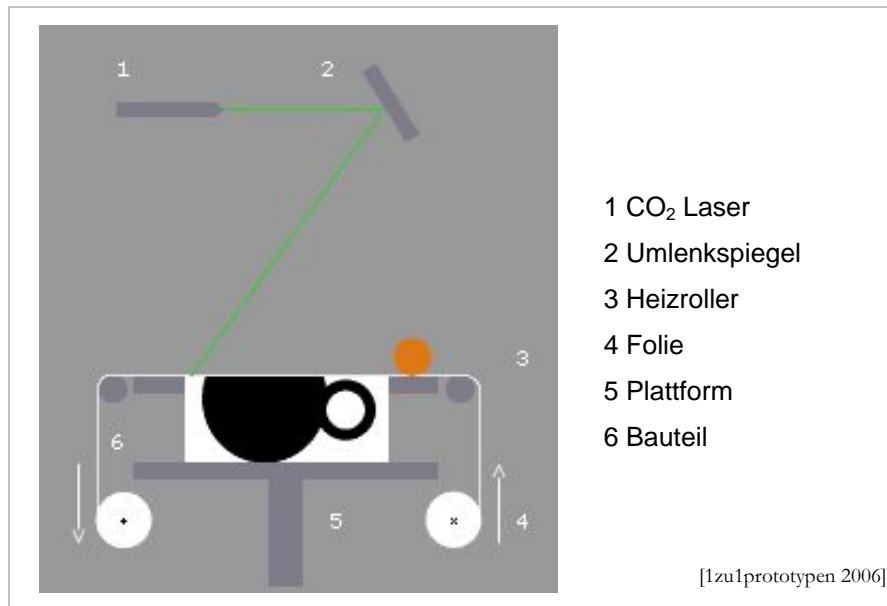


Abbildung 2-9: Verfahrensprinzip Layer Object Manufacturing

Nachteilig beim LOM ist, dass der Detaillierungsgrad der Werkstücke nicht so hoch wie bei der Stereolithographie ist und das Entfernen der Prototypen aus dem Block z.T. sehr aufwendig ist. Zudem ist der Prototyp nicht dauerhaft haltbar. Weiterhin besitzen die zur Verfügung stehenden Kunststofffolien eine geringe Transparenz. Als positiv sind die verhältnismäßig geringen Material- und Anlagenkosten zu bewerten [Gebhardt 2003].

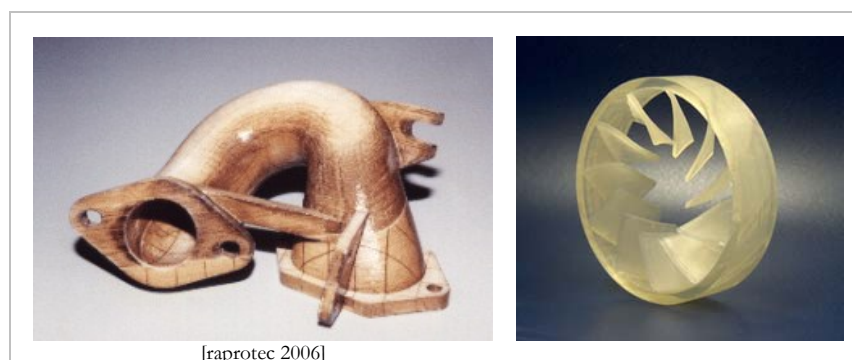


Abbildung 2-10: Beispiele Layer Object Manufacturing

Es lässt sich folgendes festhalten: Die bekanntesten Verfahren zur direkten Modellherstellung sind die Stereolithographie und das Selektive Lasersintern (gleiches Funktionsprinzip, hier wird ein Pulver gesintert). Die Stereolithographie zeichnet sich, wie bereits erwähnt, durch eine hohe Genauigkeit und gute Oberflächenqualität aus. Heutzutage stehen verschiedene verbesserte Pho-

topolymere für die unterschiedlichsten Anwendungsfälle zur Verfügung, so dass Stereolithographie-teile vielfältig einsetzbar sind. Lasergesinterte Bauteile zeichnen sich dagegen durch gute thermische und mechanische Eigenschaften aus. Ursache für eine vorhandene Ungenauigkeit der RP-Verfahren sind Schwindung oder Ausdehnung der Materialien bei und nach der Herstellung der Bauteilschichten, die zu Verzug führen. Dies ist bei der Stereolithographie die Aushärtungsschwindung oder beim Lasersintern die Kontraktion des Materials beim Abkühlen. Diese müssen im Vorfeld berücksichtigt werden. Zurzeit müssen diese Bauteile oft noch aufwendig manuell nachgearbeitet werden, um die Anforderungen an Genauigkeit und Oberflächengüte zu erreichen. Dabei kann der Zeitaufwand für die Nacharbeit oft länger sein als die Herstellungszeit.

Insbesondere komplexe Bauteilgeometrien mit Freiformflächen, Hinterschneidungen oder Hohlstrukturen können aber deutlich schneller und z.T. kostengünstiger hergestellt werden als mit konventionellen Fertigungsverfahren.

Fräsen

Im Gegensatz zum dreischrittigen Verfahren LOM erfolgen beim Fräsen die Prozessschritte in der Reihenfolge *Schicht erzeugen* – *Kontur erzeugen* – *Fügen*. Während die bisher beschriebenen Verfahren in der Lage sind, komplexe Geometrien herzustellen, können diese Geometrien beim Fräsen in der Regel nur eingeschränkt aus einem Materialblock herausgearbeitet werden. Bei einem 3-Achs-Bearbeitungszentrum können bestimmte Geometrien aufgrund von Hinterschneiden nicht bearbeitet werden. Dies würde sich nur mit einem 5-Achs-Bearbeitungszentrum z.T. realisieren lassen. Hier ist es daher notwendig, die vorhandene Bauteilgeometrie zu schneiden. Dies kann automatisch oder manuell mit entsprechender Software erfolgen (Kapitel 5). Die einzelnen Schichten werden danach separat gefräst (ein- oder beidseitig) und anschließend mit einem geeigneten Fügeverfahren schichtweise reversibel oder irreversibel gefügt (Abbildung 2-11). Das Schneiden einer Geometrie und der schichtweise Aufbau kann durchaus als Nachteil angesehen werden, allerdings kann es unter Umständen für Untersuchungen gewünscht sein, ein Modell schichtweise aufzubauen. Der Vorteil ist, dass einzelne Schichten bei reversibler Fügung ausgetauscht werden könnten, um z.B. lokale Veränderungen einer Geometrie beurteilen zu können.

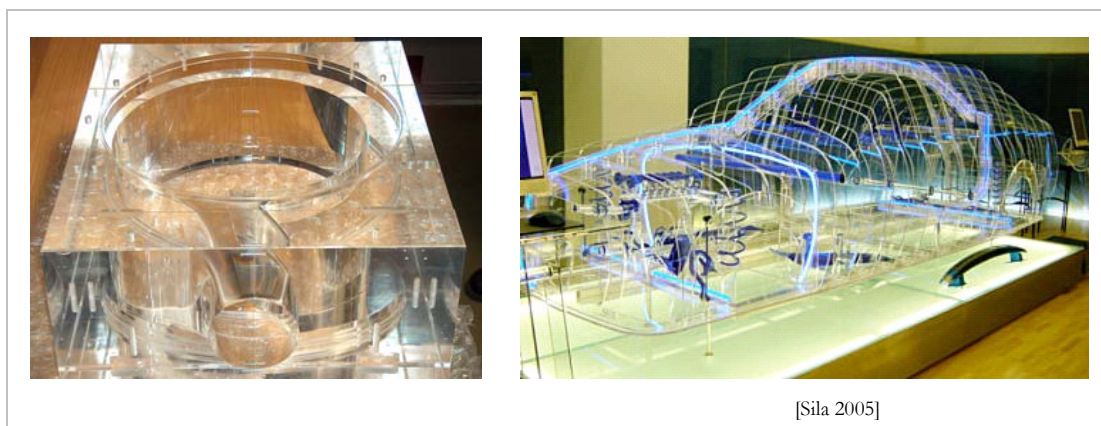


Abbildung 2-11: Verfahrensprinzip (quasi-generatives Verfahren) Fräsen

Vorteil des Fräsens ist die sehr hohe Fertigungsgenauigkeit. Daneben können gefräste Bauteile als Funktionsmodelle auch hohen mechanischen und thermischen Belastungen ausgesetzt werden.

2.3 Transparente Modelle im Modellbau

Der Einsatz transparenter Anschauungs- und Funktionsmodelle ist in sämtlichen Anwendungen zu finden. Es lassen sich in der Regel zwei Anwendungsbereiche unterscheiden. Zum einen dienen die Modelle der Entscheidungsfindung über das gewählte Design. Diese Modelle weisen ein sehr hohes Finishing auf und könnten prinzipiell auch als Funktionsmodelle verwendet werden. Das können, wie in Abbildung 2-12 dargestellt, z.B. ein Gehäusedeckel oder ein PKW-Schichtmodell sein.



[Sila 2005]

Abbildung 2-12: Anschauungsmodelle zur Entscheidungsfindung

Zum anderen dienen Modelle zum Überprüfen von Wirkprinzipien. Es wird unabhängig von Form und Größe lediglich die technische Funktion erprobt. Dabei können transparente Bauteile direkt Bestandteil relevanter Komponenten oder indirekt Bestandteil der Umgebung sein und somit keinen direkten Einfluss auf die Wirkprinzipien haben. Dargestellt in Abbildung 2-13 sind links ein Klappenschieber, rechts ein Gefäß mit einem Stent.

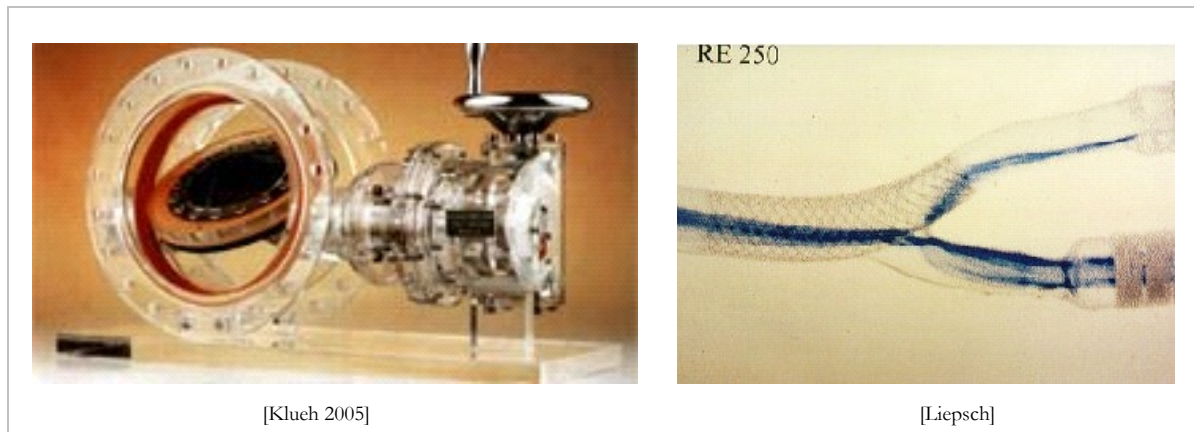


Abbildung 2-13: Funktionsmodelle mit Wirkprinzip

Unabhängig vom Verwendungszweck der Modelle lässt sich bei der Verwendung transparenter Kunststoffe folgendes unterscheiden:

- Aufgrund der Geometrie werden zum einen industriell hergestellte Materialplatten in unterschiedlichen Plattenstärken oder andere Geometrien verwendet. Diese werden dann auf z.B. Maß geschnitten, eventuell mit Bohrungen versehen und durch weitere Nachfolgeprozesse ihrem Einsatzzweck zugeführt. Anwendungsbeispiel hierfür sei ein Gehäuse.
- Zum anderen gibt es aber speziell Bedarf nach individuellen, komplexen Anschauungs- und Funktionsmodellen, die nach Kundenwunsch hergestellt werden müssen. Aufgrund der Geometrie ist hier eine Herausarbeitung dieser Geometrie aus industriell hergestelltem Rohmaterial notwendig. Dies geschieht z.B. durch Fräsen.

Beim Fräsen schließt sich in der Regel eine manuelle Nachbearbeitung an. Dabei wird die Qualität der vorangegangenen Fräsbearbeitung deutlich; sie bestimmt maßgeblich den Aufwand, der nötig ist, um das Bauteil in den gewünschten Endzustand zu bringen. Die Qualität richtet sich

nach den Forderungen des Kunden oder dem gedachten Zweck. Genügt dem einen bereits eine geschlichtete Oberfläche, so ist an anderer Stelle eine Oberflächenrauheit (R_a) von weniger als einem μm gefordert (siehe Kapitel 6.3).

3 Fräsen als quasi-generatives RP-Verfahren

Die beschriebenen generativen und quasi-generativen RP-Verfahren setzen sich prinzipiell aus konventionellen Fertigungsverfahren zusammen. Diese sind in der DIN 8580:2003-09 festgelegt. Die konventionellen Fertigungsverfahren werden in sechs verschiedene Gruppen unterteilt (vgl. Abbildung 3-1) [Witt 2005A].

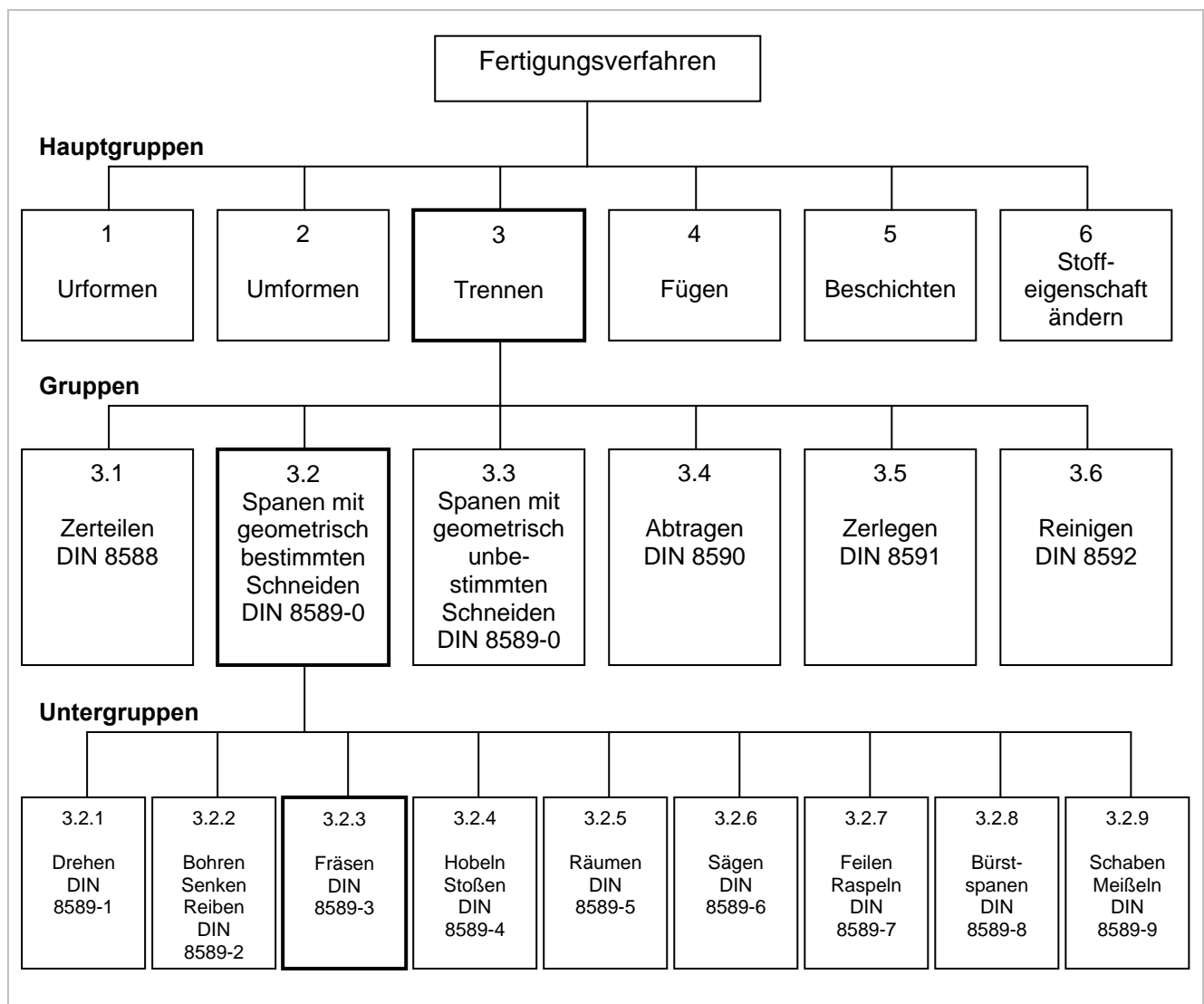


Abbildung 3-1: Fertigungsverfahren nach DIN 8580:2003-09

Der Begriff Trennen beinhaltet das Fertigen durch Aufheben des Zusammenhaltens von Körpern, wobei der Zusammenhalt teilweise oder im Ganzen vermindert wird. Das Fügen ist ein auf Dauer angelegtes Verbinden oder sonstiges Zusammenbringen von zwei oder mehreren Werkstücken geometrisch bestimmter fester Form oder von eben solchen Werkstücken mit formlosem Stoff, dabei wird der Zusammenhalt örtlich geschaffen und im Ganzen vermehrt.

Die Hauptgruppen sind weiterhin in Gruppen unterteilt (Ordnungsnummern), wobei hier die Gruppe 3.2 relevant ist. Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden bedeutet Spanen, bei dem ein Werkzeug verwendet wird, dessen Schneidenanzahl, Geometrie der Schneidkeile und Lage der Schneiden zum Werkstück bestimmt sind.

3.1 Grundlagen Fräsen

Fräsen ist der Gruppe *Trennen/Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide* zuzuordnen. Das bedeutet, dass bei diesem Verfahren durch die Schneiden des Werkzeuges (Fräser) von einem Werkstück Teile des Materials in Form von Spänen mechanisch abgetrennt werden. Fräsen ist damit Spanen mit kreisförmiger, einem meist mehrzahnigen Werkzeug zugeordneter Schnittbewegung und mit senkrecht oder auch schräg zur Drehachse des Werkzeuges verlaufender Vorschubbewegung zur Erzeugung beliebiger Werkstückoberflächen. Das Fräsen wird in verschiedene Fräsverfahren unterteilt, welche zusätzlich nach der Art des Werkzeugeingriffes unterschieden werden (Abbildung 3-2).

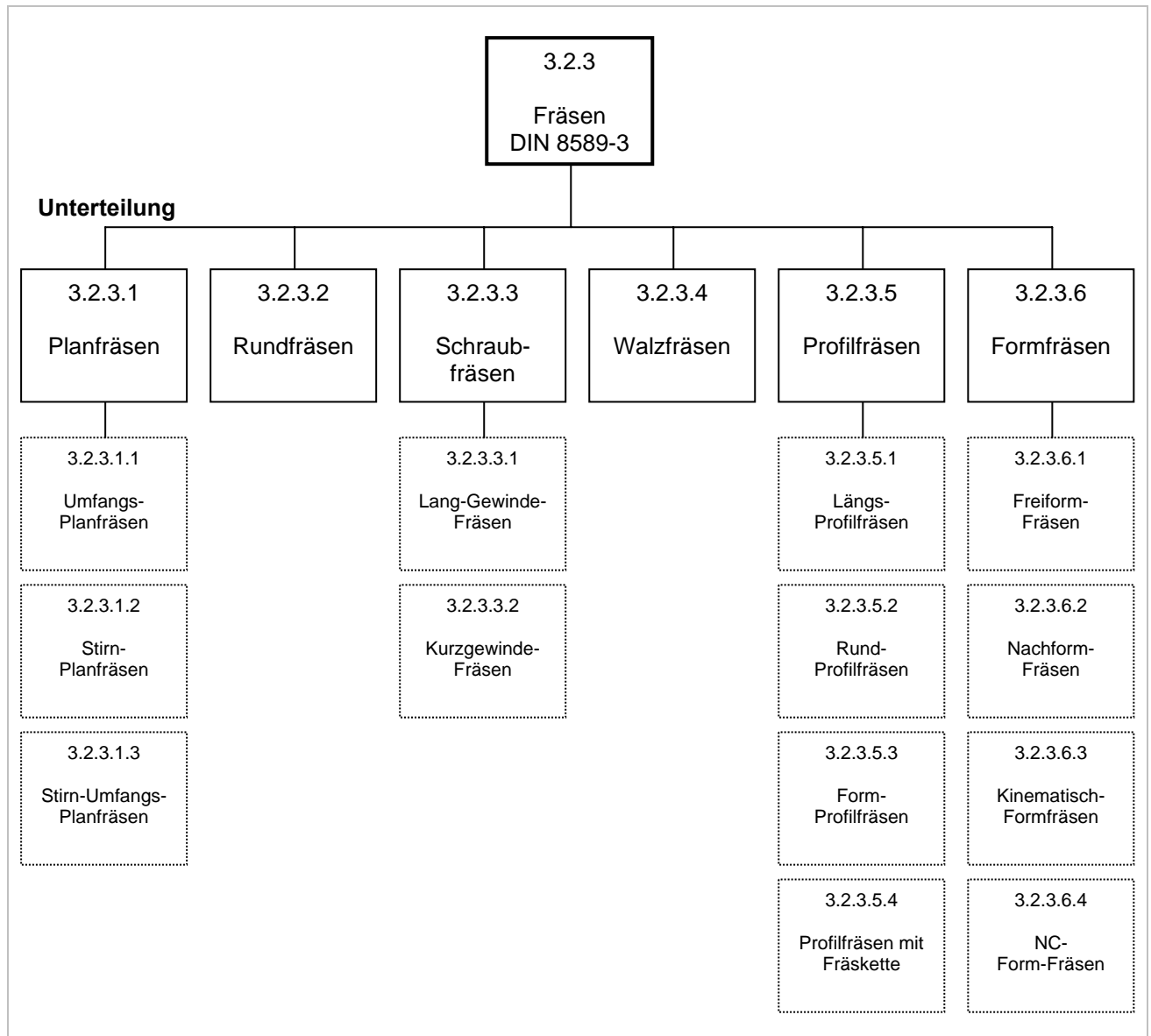


Abbildung 3-2: Einteilung Fräsen nach DIN 8589-3:2003-09

Die Fräsverfahren haben einen wesentlichen Einfluss auf die Oberflächengüte der Werkstoffe und damit auf das Ergebnis. Da dies Bestandteil der vorliegenden Arbeit ist, werden zum besseren Verständnis die einzelnen Gruppen kurz erläutert [König 1990]:

Planfräsen ist Fräsen mit geradliniger Vorschubbewegung zur Erzeugung ebener Flächen. Die Verfahrensvarianten des PlanfräSENS werden nach der Art des Werkzeugeingriffes unterschieden und sind in Abbildung 3-3 abgebildet. Beim Stirn-Planfräsen wird die gewünschte Werkstückform beispielsweise durch die am Umfang liegenden Schneiden erzeugt.

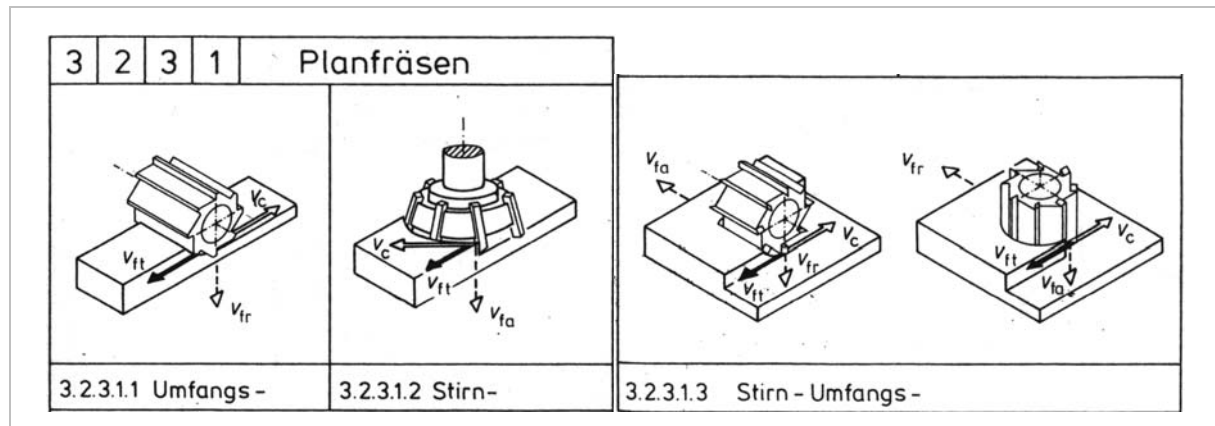


Abbildung 3-3: Verfahrensvarianten des Planfräsen

Das *Rundfräsen* ist Fräsen mit einer kreisförmigen Vorschubbewegung und dient der Erzeugung kreiszylindrischer Flächen. Werkzeug- und Werkstückdrehachse stehen dabei im Allgemeinen parallel zueinander. Die Unterscheidung in unterschiedliche Verfahrensvarianten erfolgt analog zum Planfräsen.

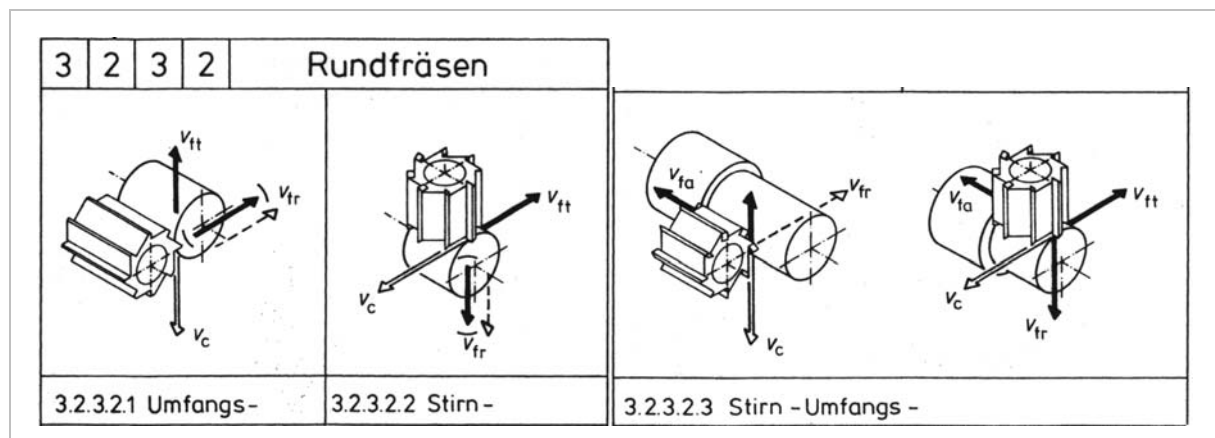


Abbildung 3-4: Verfahrensvarianten Rundfräsen

Profilfräsen dient zur Erzeugung gerader, rotationssymmetrischer oder beliebig in einer Ebene gekrümmter Profilflächen. Zu diesem Zweck wird ein Fräser verwendet, dessen Profil an die zu erstellende Geometrie angepasst ist. Dabei wird zwischen Längsprofilfräsen (gradlinige Vorschubbewegung) und Rundprofilfräsen (kreisförmige Vorschubbewegung) unterschieden.

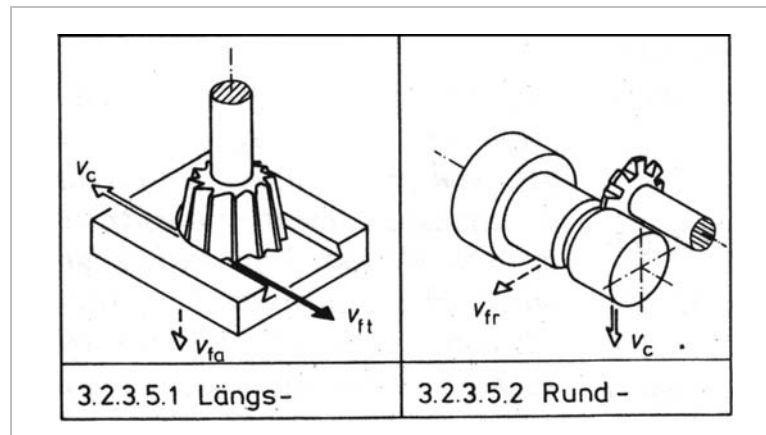


Abbildung 3-5: Verfahrensvarianten Profilfräsen

Formfräsen ist Fräsen, bei dem durch eine, in der Ebene oder räumlich gesteuert, Vorschubbewegung die gewünschte Form des Werkstückes erzeugt wird. Dabei ist für die praktische Anwendung das NC (Numerical Control)-Fräsen von besonderer Bedeutung, da mit diesem Fräsverfahren selbst komplizierte Werkstückformen mit einfachen Normwerkzeugen hergestellt werden können.

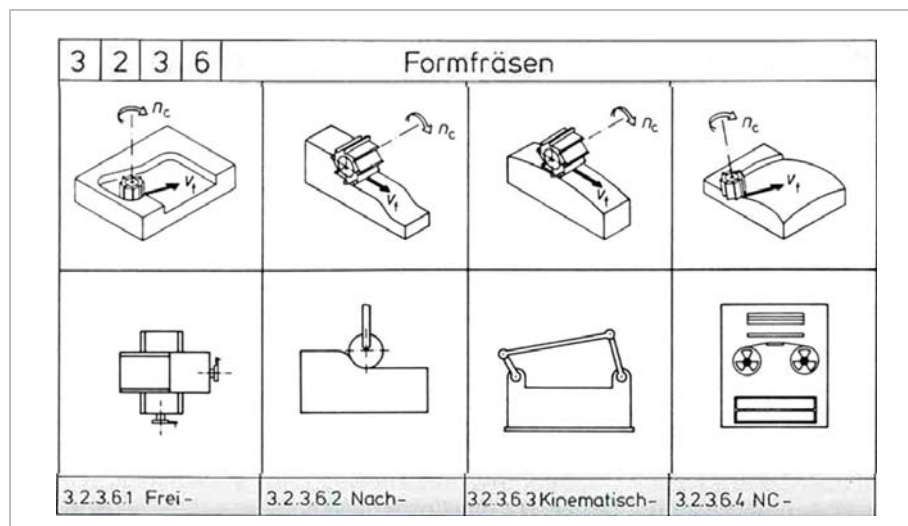


Abbildung 3-6: Verfahrensvarianten Formfräsen

Ein weiterer Gesichtspunkt für die Unterscheidung von Fräsverfahren ist die Richtung der Vorschubbewegung gegenüber der Schnittbewegung. Beim Gegenlauffräsen sind die Drehrichtung des Fräasers und die Vorschubbewegung entgegengesetzt gerichtet, beim Gleichlauffräsen hingegen gleich (vgl. Abbildung 3-7). Dabei zeigt das Gegenlauffräsen gegenüber den Gleichlauffräsen

den Nachteil, dass aufgrund des ungünstigeren Zerspanungsverlaufes eine stärkere Verschleißbelastung des Werkzeuges auftritt und somit auch deutlich kürzere Standzeiten (Lebensdauer des Fräasers) vorliegen. Zudem ist die erzielbare Oberflächengüte beim Gleichlaufräsen in der Regel besser, da Rattermarken auf der Werkstücksoberfläche meist nur beim Gegenlaufräsen aufgrund stärkerer Auffederungseffekte auftreten.

Jedoch ist beim Gegenlaufräsen die Schnittkraft von Maschinentisch weg gerichtet, wodurch die Gefahr besteht, dass der Fräser das Werkstück aus der Aufspannung reißt. Daher ist eine aufwendige Einspannung erforderlich, die bei komplizierten Bauteilen nicht immer gewährleistet werden kann. In solchen Fällen kommt dann das Gleichlaufräsen zum Einsatz.

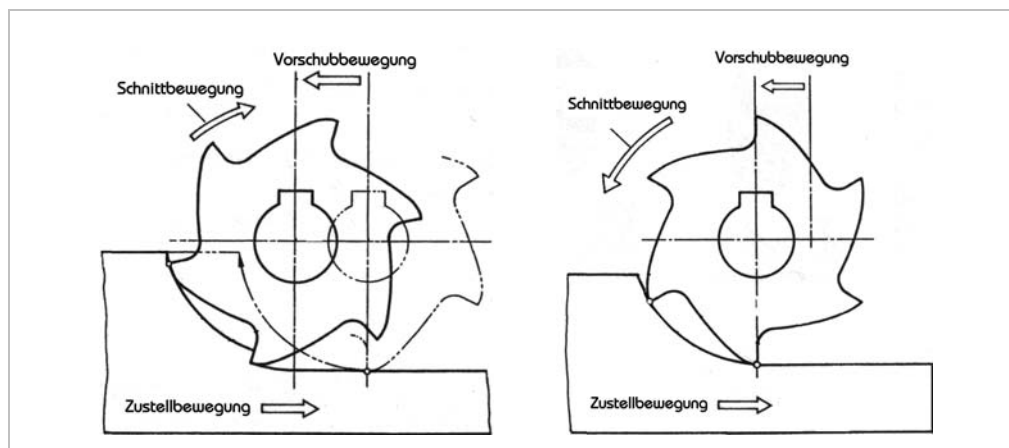


Abbildung 3-7: Arbeitsbewegungen beim Gegen- und Gleichlaufräsen

Wesentliche Einflussparameter an ein optimiertes Fräsen sind z.B. das verwendete Werkzeug, erforderliche Bearbeitungsparameter sowie eine geeignete Bearbeitungs- und Frässtrategie (siehe hierzu Kapitel 4).

3.2 Konventionelles Fräsen vs. Hochgeschwindigkeitsfräsen (HSC)

Hochgeschwindigkeitsfräsen HSC (High Speed Cutting) beruht auf der Entwicklung innovativer Frästechnologien, welche weitaus höhere Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeiten zulassen als die im vorherigen Kapitel beschriebenen klassischen Fräsverfahren. Es werden durch eine höhere Schnittgeschwindigkeit die wesentlichen Zerspanungsparameter entscheidend verbessert, so dass

bei steigender Schnittgeschwindigkeit einerseits mehr Span pro Zeit abgehoben und andererseits aufgrund der geringeren Zerspanungskräfte eine bessere Oberflächengüte und Formgenauigkeit erreicht wird. Damit ist weniger manuelle Nachbearbeitung erforderlich. Dabei werden beim HSC-Fräsen um den Faktor fünf bis zehn Mal höhere Schnittgeschwindigkeiten und Vorschübe als bei der konventionellen Bearbeitung eingesetzt. Sie liegen damit für den Werkstoff Stahl üblicherweise zwischen 500 und 1.500 m/min, teilweise auch höher (je nach Werkstoff bis zu 7000 m/min) [Franz 2001]. Zur Veranschaulichung ergibt dies für einen Fräser mit 6 mm Durchmesser eine Drehzahl von etwa 40.000 Umdrehungen pro Minute. Diese hohen Schnittgeschwindigkeiten werden mit hohen Vorschubgeschwindigkeiten kombiniert. Auch diese werden gegenüber der konventionellen Bearbeitung um den Faktor fünf bis zehn erhöht und liegen damit etwa zwischen 2000 und 20.000 mm/min. Allerdings gibt es auch Anwendungen, die diese sehr hohen Geschwindigkeiten nicht erreichen. Hier wird vom Übergangsbereich zwischen Hochgeschwindigkeits- und konventionellem Fräsen gesprochen [Leopold 1999]. Das HSC-Fräsen basiert vor allem auf der Reduzierung der bei der Zerspanung entstehenden Wärmemenge, die das Werkzeug schwächt. Bei konventioneller Bearbeitung steigt die Temperatur des Werkstückes, der Späne und des Werkzeuges mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit und abnehmender Spandicke immer weiter.

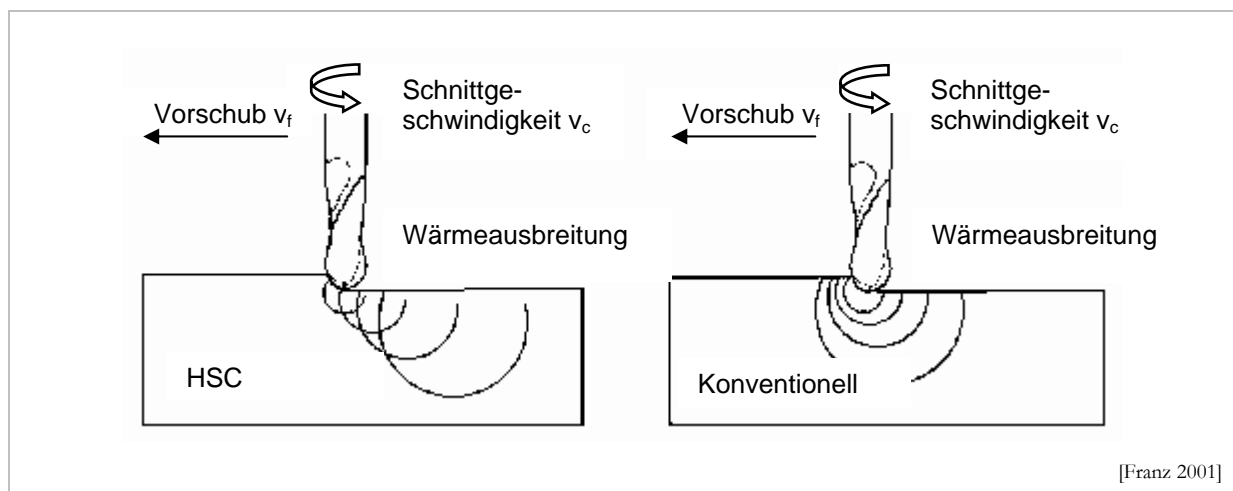


Abbildung 3-8: Vergleich HSC gegenüber konventionellen Fräsen

Wird die Vorschubgeschwindigkeit beim HSC-Fräsen um das fünf bis zehnfache erhöht, so nimmt die Temperatur an den Schneiden nur geringfügig zu. Der Grund hierfür liegt darin, dass die Vorschubgeschwindigkeit die Wärmeleitgeschwindigkeit des zerspanten Grundwerkstoffs übersteigt. Der Fräser „eilt“ der Wärmeausbreitung voraus (Abbildung 3-8). Damit wird die Aus-

breitung der in der Kontaktzone entstehenden Wärmemenge in den Grundwerkstoff des Werkstückes und des Fräasers größtenteils verhindert und der Hauptanteil der Schnittwärme über den Span abgeführt. Der Lebensdauer des Werkzeuges erhöht sich dadurch erheblich.

3.3 Problemstellungen beim Fräsen transparenter Kunststoffe

Die Abhängigkeit von Schnittgeschwindigkeit v_c sowie Drehzahl n und dem Fräserdurchmesser d ist durch folgende Formel gegeben [König 1990]:

$$v_c = \frac{n \cdot \pi \cdot d}{1000} \quad \begin{array}{l} V_c \text{ in [m/min]} \\ n \text{ in [1/min]} \\ d \text{ in [mm]} \end{array} \quad (\text{Gl. 3.1})$$

Die Schnittgeschwindigkeit v_c ist die Bewegung zwischen Werkzeug und Werkstück, die ohne Vorschubbewegung nur eine einmalige Spanabnahme während einer Umdrehung bewirkt.

Weiterhin gibt es einen Zusammenhang zwischen Vorschubgeschwindigkeit v_f sowie Drehzahl n , Vorschub pro Zahn f_z und Anzahl der Zähne z am Fräser:

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n \quad \begin{array}{l} V_f \text{ in [mm/min]} \\ f_z \text{ in [mm/Zahn]} \\ z \text{ [Anzahl Zähne]} \\ n \text{ in [1/min]} \end{array} \quad (\text{Gl. 3.2})$$

Die Vorschubgeschwindigkeit v_f gibt die vom Werkzeug zurück gelegte Strecke tangential zum Werkstück innerhalb einer Minute an. f_z ist der Weg pro Zahn, den das Werkzeug in den Werkstoff eindringt. Zudem ist die Schnitttiefe a_p zu berücksichtigen, die Tiefe, die das Werkzeug senkrecht in das Werkstück eindringt. Weitere Kenngrößen am Werkzeug sind der Freiwinkel α_0 und der Keilwinkel β_0 (Abbildung 3.9). Der Freiwinkel α_0 soll die Reibung und damit die Erwärmung der Schneide und des Werkstückes verringern. In Abbildung 3-9 ist schematisch das Eingreifen einer Schneide am Werkstück dargestellt [Witt 2005B]. Die Größe des Keilwinkels β_0 hängt von der Härte und Festigkeit des Werkstücks ab. Je kleiner der Keilwinkel ist, desto leichter fällt die Zerspanung, aber umso größer ist auch der Schneidenverschleiß, was eine geringere Standzeit der Schneide verursacht [Tschätsch 1991].

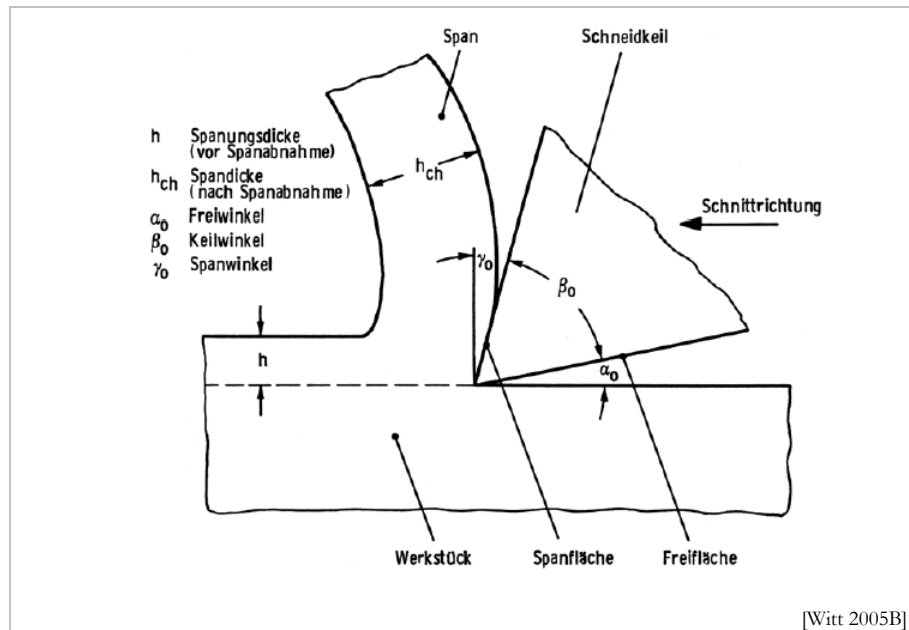


Abbildung 3-9: Wirkstelle Fräser und Werkstück (schematisch)

Der Spanwinkel γ_0 beeinflusst die Spanbildung und die Schnittkräfte. Je größer der Spanwinkel, desto kleiner sind die Schnittkräfte, aber die Bruchgefahr und der Verschleiß der Schneide erhöhen sich.

Möchte der Anwender auf veröffentlichte Angaben der Parameter für Werkstoffe seitens Werkstoffhersteller, Universitäten, Dienstleister oder Fachliteratur usw. zurückgreifen, werden die dort vorliegenden Defizite sichtbar. Nachfolgende Tabelle 3-1 gibt beispielhaft einen Überblick über die zu verwendenden Parameter beim Fräsen von Plexiglas (PMMA).

Werkstoff	Freiwinkel α_0	Spanwinkel γ_0	Schnittgeschwindigkeit v_c [m/min]	Quelle
PMMA	2-10°	1-5°	bis 2000	Einführung in die Kunststoffverarbeitung - Michaeli
	5-15°	0-15°	bis 1000	Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften - Domininghaus
	2-10°	2-10°	2000	www.ahlborn-kunststoffe.at
	2-10°	0-5°	200-4500	www.röhm.de
	25-30°	20-25°	130-300	www.fbv.fh-frankfurt.de

Tabelle 3-1: Richtwerte für das Fräsen von PMMA

Allein die Betrachtung der Schnittgeschwindigkeiten zeigt, dass nur grobe Wertebereiche angegeben sind und diese z.T. sehr stark voneinander abweichen. Daraus lässt sich ableiten, dass für jede Anwendung optimale Parameterwerte selbst zu ermitteln sind. Unternehmen geben auf Anfrage lediglich an, dass das Fräsen von Kunststoffen durch jahrelange Versuche zu einem Wissen führt, welches nicht nach außen weitergegeben wird. Eigene Versuche sind deshalb unerlässlich.

In der vorliegenden Arbeit wird ein 3-Achs-Bearbeitungszentrum mit einer maximalen Drehzahl von 9000 1/min verwendet. Die in Tabelle 3-1 dargestellten Werte für die Schnittgeschwindigkeit sollen nun beispielhaft genutzt werden, um den Einfluss auf Fräserdurchmesser und Drehzahl zu verdeutlichen. In Tabelle 3-2 werden gemäß Gleichung 3-1 verschiedene Kombinationen gegenübergestellt.

Fräserdurchmesser d [mm]	Drehzahl n [1/min]	Schnittgeschwindigkeit v_c [m/min]
5	9000	141,3
5	2000	31,4
10	9000	282,6
10	2000	62,8
71	9000	2000
5	63694	2000

Tabelle 3-2: Einfluss unterschiedliche Parameter

Bei Verwendung eines 5 mm Fräasers und einer Drehzahl von 9000 1/min ergibt sich eine Schnittgeschwindigkeit von 141,3 m/min. Damit liegt dieser Wert im unteren Bereich aus Tabelle 3-1. Wird die Drehzahl gesenkt, sinkt auch die Schnittgeschwindigkeit und der Wert ist laut Tabelle 3-1 nicht mehr akzeptabel. Ähnlich verhält es sich bei der Verwendung eines Fräasers mit größerem Durchmesser. Wird nun eine Schnittgeschwindigkeit von 2000 m/min angenommen, und eine Drehzahl von 9000 1/min, so ergibt sich ein Fräser mit einem Durchmesser von 71 mm, der die Anwendung auf extrem große Bauteile beschränken würde. Die für einen 5 mm Fräser und bei einer Schnittgeschwindigkeit von 2000 m/min benötigte Drehzahl liegt bei ca. 63.000 1/min und erfordert damit ein HSC-Bearbeitungszentrum. Neben den beschriebenen Angaben über die Schnittgeschwindigkeiten wird auch oft der Vorschub pro Zahn f_z angegeben. Dieser liegt laut Literatur in dem Bereich von 0,03 bis 0,5 mm/Zahn.

Einzelne Dienstleister [z.B. Ahlborn 2005] bieten für verschiedene Problemstellungen Hilfen an. Beispielhaft sind diese in Tabelle 3-3 aufgeführt.

Problemstellung	Kennbuchstabe
Schlechte Oberflächengüte	A
Hoher Schneidenverschleiß an den Freiflächen	B
Schneidenausbruch	C
Aufbauschneide	D
Spänestau im Fräser	E
Werkzeugbruch	F
Rattern / Vibrationen	G

Tabelle 3-3: Probleme beim Fräsen

Über die jeweiligen Kennbuchstaben kann aus einer weiteren Tabelle ermittelt werden, wie diese Problemstellungen gelöst werden können. Tabelle 3-4 zeigt einen typischen Auszug der Maßnahmen.

A	B	C	D	E	F	G	Abhilfe
x	x		x		x		Schnittgeschwindigkeit v_c erhöhen
		x				x	Schnittgeschwindigkeit v_c verringern
	x					x	Vorschub v_f erhöhen
x		x		x	x		Vorschub v_f verringern
x		x	x	x	x	x	Schnitttiefe a_p verringern

Tabelle 3-4: Lösungsvorschläge für das Fräsen

Wie Tabelle 3-4 zeigt, wird nur vorgeschlagen, Parameterwerte zu erhöhen oder zu verringern. Dies verdeutlicht erneut die Schwierigkeit bei der Ermittlung optimaler Fräseparameter. Hier muss sich der Anwender durch eigene Versuche dem gewünschten Resultat annähern. Darüber hinaus beeinflussen in der Regel mehrere Parameter das Ergebnis [König 1990].

Die Ausführungen zeigen die bestehenden Defizite, die zur Verfügung stehenden Angaben können nur als Richtwerte genutzt und müssen an das jeweilige Bearbeitungszentrum angepasst werden.

3.4 Transparente Kunststoffe

Viele Kunststoffe weisen gegenüber Metallen und Holzprodukten den Vorteil der Lichtdurchlässigkeit auf. Diese Eigenschaft wird in zahlreichen technischen Bereichen genutzt. Die amorphen Thermoplaste wie Plexiglas (PMMA) und Makrolon (PC) unterscheiden sich in ihren optischen Eigenschaften nicht wesentlich von denen der anorganischen Gläser. Trübung und verminderte Durchlässigkeit weisen auf Unregelmäßigkeiten in der Oberfläche hin. Dabei kann es sich um Füllstoffteilchen, Schmutzteilchen, Fehlstellen, Oberflächenrauheiten und ähnliches handeln.

Die optischen Eigenschaften eines Werkstoffes betreffen sein Verhalten gegenüber Lichtstrahlen im sichtbaren Bereich sowie im ultravioletten und infraroten Bereich. Beim Übergang von einem Stoff in einen anderen erfahren die Lichtstrahlen eine Brechung, der durch die Brechzahl beschrieben wird.

Beim spanenden Bearbeiten von Thermoplasten treten folgende Probleme auf: Wie alle Kunststoffe sind sie keine guten Wärmeleiter, so dass die am Werkzeug entstehende Wärme nur schlecht abgeführt wird – der Werkstoff wird heiß, er schmilzt und schmiert. Zudem führen Wärmeunterschiede im Material zu eingefrorenen Spannungen, der Thermoplast wird empfindlicher gegen Witterung oder Chemikalien [Domininghaus 1998, Michaeli 1999].

3.4.1 PMMA (Plexiglas)

Wie die meisten Kunststoffe ist PMMA (Polymethylmethacrylat) unter einer Vielzahl von Bezeichnungen bekannt. Der Allgemeinheit ist dieser Kunststoff unter seinen Markennamen Plexiglas geläufig (eingetragene Marke der Röhm GmbH, Darmstadt)

Aufgrund seiner ausgezeichneten optischen Eigenschaften wird PMMA sowohl in vielen Bereichen des täglichen Lebens als auch für Spezialanwendungen (bevorzugt als Modellbauwerkstoff), wie z.B. die Luft- und Raumfahrttechnik, anstelle von (Silikat-)Glas eingesetzt. Dabei liegt der wesentliche Vorteil von Plexiglas darin, dass es bei halbem Gewicht eine vergleichbare Transpa-

renz zu Glas aufweist und zudem neben einer hohen Witterungs- und Altersbeständigkeit ein enormes Eigenschaftenspektrum durch Variation der chemischen Zusätze abdecken kann. Unbehandeltes Plexiglas zeichnet sich durch eine hohe Härte, Bruchsicherheit, Steifigkeit und Festigkeit sowie eine hohe Formbeständigkeit bei Wärme aus. Außerdem besitzt es eine kratzfeste, hochglänzende, polierfähige Oberfläche, so dass es rein optisch kaum von Glas zu unterscheiden ist.

Plexiglas ist grundsätzlich in zwei Qualitäten lieferbar:

- Plexiglas XT (extrudiert) wird hergestellt, indem Acrylgranulat geschmolzen und anschließend in Platten-, Stab- oder Rohrform gebracht wird. Die Granulatkörner werden im Extruder zum Schmelzen und die so entstehende Acryl-Schmelze am Extruderende durch Düsen in die gewünschte Form gebracht.
- Plexiglas GS (gegossen) entsteht, wenn die Grundstoffe in einer Form, beispielsweise zwischen zwei Glasplatten, zusammengebracht werden und dort zum Polymer reagieren.

Gegossenes Plexiglas hat einen verarbeitungstechnischen Vorteil, es lässt sich leichter spanend bearbeiten. Extrudiertes Plexiglas schmilzt bei der Bearbeitung schneller, verschmiert Bohrer und Sägen und behält eine weiße Schnittkante. Es bietet allerdings einen Preisvorteil, da die Extrusion weniger aufwendig ist als das Gießen zwischen Glasplatten.

3.4.2 PC (Makrolon)

Seit Mitte der 50er Jahre wird Polycarbonat (PC) großtechnisch hergestellt und unter dem Handelsnamen Makrolon angeboten. Bekannt ist dieser hochtransparente und hitzebeständige Kunststoff als Hauptbestandteil der Compact Disc (CD); schon 1983 gingen 20 % der europäischen Produktion in die Herstellung von Tonträgern. Von der jährlichen Weltproduktion wird mehr als die Hälfte für elektronische und elektrische Geräte verbraucht: Starkstromstecker wie Kameragehäuse, Leuchtstoffröhrensockel wie Blinklampen erfordern einen harten und festen Kunststoff mit guten thermischen und optischen Eigenschaften. Seine hohe Schlagzähigkeit in einem großen Temperaturfeld und seine Witterungsbeständigkeit empfehlen PC auch für den Einsatz am Bau. Dank seiner guten Klebeeigenschaften und einfachen Verarbeitung ist Polycarbonat als Modell-

bauwerkstoff geeignet. Ein wesentlicher Nachteil ist allerdings, dass die Materialplatten nur bis zu einer Materialstärke von 12 mm hergestellt werden.

3.4.3 PETG (Simolux)

Simolux, ein Handelsname für PETG (Polyethylen Terephthalat Glycol), wird vor allem für transparente Kunststoffflaschen benutzt. Bei diesem Material wird die Kristallisation durch eine chemische Modifizierung verhindert. So bleibt der Werkstoff auch bei Erwärmung über den Erweichungstemperaturbereich hinaus transparent. Im Vergleich hierzu ist bei den so genannten Amorphen Polyestern (A-PET) die Kristallisation nur „verzögert“, d. h. nach einer Erwärmung im Ofen neigt das deutlich sprödere Material zum Kristallisieren und bleibt danach milchig transluzent. Durch die sehr gute Warmformbarkeit und hohe Zähigkeit des Materials können selbst hohe Verstreckungen ohne Dünnstellen oder Materialbrüche realisiert werden [Griebel 2002]. Auch hier ist ein wesentlicher Nachteil, dass die lieferbare Materialstärke maximal 12 mm beträgt. Das Haupteinsatzgebiet von PETG liegt, wie auch beim Polycarbonat, in anderen technischen bzw. speziellen Anwendungen als beim PMMA.

3.4.4 COC (Topas)

Der Kunststoff COC - Cycloolefin Copolymer - (Markenname Topas: Thermoplastic Olefin Polymers of Amorphous Structure) wird in großen Maße für durchsichtige Lebensmittel- und Medikamentenverpackung eingesetzt. Aufgrund seiner amorphen Struktur weist Topas gute optische Eigenschaften auf, wobei er sich neben seiner guten Steifigkeit und Festigkeit besonders durch seine gute Bioverträglichkeit und außerordentlich hohen Sperrwirkung gegen Wasser auszeichnet [Ticona 2005]. Deshalb besteht sein Haupteinsatzgebiet zurzeit in der Lebensmittelindustrie und der Medizintechnik, wo er seit seiner Markteinführung im Jahr 2000 eine große Verbreitung gefunden hat. Aufgrund seiner günstigen Werte in Bezug auf Steifigkeit, Temperaturbeständigkeit sowie Druck- und Biegefestigkeit ist zu erwarten, dass er sich in naher Zukunft in den zur Zeit von Silikat- und Plexiglas dominierten technischen Bereichen wie Architektur oder Maschinenbau als ernstzunehmender Konkurrent präsentieren wird. Topas wird aufgrund seines derzeitigen Einsatzgebietes jedoch nur in den Abmessungen 60 x 60 x 2 mm hergestellt.

Zusammenfassend sind in der Tabelle 3.5 nochmals die Kunststoffe mit ihren Merkmalen aufgeführt.

Material	Handelsname	Brechzahl n	Dichte g/cm ³	Materialkosten €/kg	Transmission %	Eigenschaften
PMMA (GS) Polymethylmethacrylat	Plexiglas Perspex	1,491	1,19	~ 6	92	hohe Transparenz, Kratzunempfindlich, gute mech. Eigenschaften (Linsen, Gewächshäuser) - bis 80°C
PC (9034) Polycarbonat	Makrolon Lexan	1,58	1,22	~ 5	86	hohe Transparenz, Kratzunempfindlich, gute mech. Eigenschaften (ohne Bohröl) (Hauptbestandteil der CD, elektrische Geräte) - bis 140°C
PETG Polyethylen Terephthalat Glycol	Simolux Impet	1,57	1,27	~ 45	90	hohe Transparenz, Kratzunempfindlich, gute mech. Eigenschaften (ohne Bohröl) (Wasserflaschen, Verpackungen) - bis 65°C
COC (5013) Cycloolefin Co Polymere	Topas	1,533	1,02	~ 12	93	hohe Transparenz, geringe Doppelbrechung, gute Steifigkeit, (Optische Speichermedien, Bisterverpackung) - bis 130°C

Tabelle 3-5: Auswahl transparente Kunststoffe

Wie in obiger Tabelle 3-5 zu erkennen ist, liegen die Materialkosten für PETG bei etwa 45 €/kg und sind damit entsprechend hoch. Weiterhin wird der Werkstoff Topas nur in kleinen Rohteilmäßen hergestellt. Im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit sowie notwendige Plattenstärken für einen schichtweisen Modellbau wird in der vorliegenden Arbeit auf die Untersuchung der beiden Werkstoffe verzichtet.

4 Einflussparameter auf die Transparenz

Zur Optimierung von Zerspanungsprozessen ist die genaue Kenntnis der Einflussparameter auf den Bearbeitungsprozess notwendig [Klocke u. Kopner 2002]. So haben die physikalisch-chemischen Materialeigenschaften einen entscheidenden Einfluss auf die Zerspanbarkeit des Werkstoffes und somit auf die Zerspanungsgrößen wie z.B. Kraft und Temperatur, die den Verschleiß unmittelbar beeinflussen. Verwendete Kühlschmierstoffe verändern z.B. die Reibungs- und Kühlungsverhältnisse im Schnittstellenbereich der Werkzeugschneide und des Werkstoffes (Wirkstelle). Weiterer Parameter in einem (tribologischen) Zerspanungssystem ist das Werkzeug, welches durch den Schneidstoff, durch seine Schneidengeometrie und durch die Beschichtungstechnologie entscheidend verändert werden kann. Nicht zu vernachlässigen ist der Einfluss der Maschinensteifigkeit und -dynamik, die durch die Maschinenkonstruktion gegeben ist. Einbegriffen sind auch die Spannmittel, die die direkte Schnittstelle zwischen Werkstück und Maschine darstellen. Die Einflussgrößen können Allgemein in fünf Gruppen eingeteilt werden [König 1990, Awiszus et al. 2004]:

- Werkstück
- Werkzeug
- Werkzeugmaschine
- Schnittbedingung
- Bearbeitungsstrategie

4.1 Werkstück

Beim Fräsen ist die Kenntnis des zu spanenden Werkstückes sehr wichtig. Dazu gehören Informationen über *Werkstoffbezeichnung, Festigkeit, Gefüge, Homogenität, Abmessungen, Gestalt* und *Stabilität*. Ob ein Werkstück aus Aluminium, Designer-Werkstoff (z.B. Schäume) oder Kunststoff bearbeitet wird, hat wesentlichen Einfluss auf die Bearbeitungsparameter. So führt eine zu große Vorschubgeschwindigkeit bei harten Werkstoffen zum Bruch des Werkzeuges oder reduziert die Lebensdauer des Werkzeuges. Weiche Werkstoffe wie Thermoplaste sind keine guten Wärmeleiter, so dass am Werkzeug entstehende Wärme nur schlecht abgeführt wird, der Werkstoff wird heiß.

In diesen Fällen muss ein entsprechendes Kühlmittel verwendet werden, welches nicht nur die Wärme abführt, sondern auch die entstehende Reibung vermindert und den Transport der Späne unterstützt. Kunststoffe sind z.T. sehr spröde, so dass unter der Krafteinwirkung der Bearbeitung Materialstücke herausbrechen können und das Werkstück anschließend neu gefertigt werden müsste. Darüber hinaus entstehen in diesen Werkstoffen Spannungen, welche nach der Bearbeitung durch Wärmezufuhr in einem Ofen abgebaut werden müssen. Wird dieser Schritt vernachlässigt, bilden sich nach kurzer Zeit Spannungsrisse. Die Abmessungen des Werkstückes sind wichtig, da jedes Bearbeitungszentrum nur eine bestimmte Bauraumgröße aufweist. Nach der Werkstückgröße richtet sich daher das zur Verfügung stehende Bearbeitungszentrum oder die Bauteilgeometrie muss in Schichten geschnitten, die Schichten separat gefräst und anschließend gefügt werden. Zudem haben die Abmessungen des Werkstückes Einfluss auf das zu verwendete Spannmittel. Es muss z.B. verhindert werden, dass sich das Werkstück durchbiegt bzw. lokal den Kontakt zum Spannmittel verliert. Die Folge wären Maß- und Formfehler.

4.2 Werkzeug

Fräswerkzeuge besitzen in der Regel mehrere Schneiden, wovon immer nur eine Schneide vorübergehend im Eingriff ist. Dadurch entsteht ein für das Fräsen charakteristischer unterbrochener Schnitt. Fräswerkzeuge bestehen insgesamt oder nur an den Schneiden aus Hochleistungsschnellarbeitsstahl (HSS), Hartmetall, Schneidkeramik, Polykristallinem Diamant oder kubischem Bornitrid. Sie müssen aufgrund der beim Fräsen auftretenden Belastungen eine große Härte sowie eine hohe Zähigkeit und Temperaturwechselbeständigkeit besitzen. Der auftretende Werkzeugverschleiß wird hervorgerufen durch mechanische und thermische Beanspruchung des Werkzeugs, die abhängig vom Werkstoff, dem Schneidstoff und den jeweiligen Schnittbedingungen sind. Dieser Werkzeugverschleiß führt zu einer Veränderung der Schneidengeometrie und wirkt sich so negativ auf die Oberflächengüte und Maßhaltigkeit des Werkstückes aus. Die häufigsten Verschleißformen sind [König 1990, Paucksch 1996]:

- Freiflächenverschleiß (normale Verschleißform)
- Kolkverschleiß (bei hoher Werkzeugtemperatur)
- Querrisse (Schlagbeanspruchung an nicht ausreichend zähen Schneidplatten)
- Kammrisse (Folge von häufigen Temperaturwechseln, die durch Dehnen und Schrumpfen den Schneidstoff ermüden)
- Ausbröckelungen, Aufbauschneiden und Verformungen

Darüber hinaus kann es zu Verschleiß (Adhäsion, Abrasion, Oberflächenzerrüttung, tribochemische Reaktion) kommen. Tribologie umfasst das Gesamtsystem von Reibung und Verschleiß, einschließlich Schmierung. Reibung und Verschleiß sind dabei keine geometrie- oder stoffspezifischen Eigenschaften nur eines der beteiligten Elemente (wie z.B. Wärmeleitfähigkeit, Rauheit, Werkstoffgefüge), sondern sind Systemeigenschaften. Schon wenn eine Einflussgröße des Systems modifiziert wird, kann sich das Reibungs- und/oder das Verschleißverhalten des Systems gravierend verändern. Bei tribochemischen Reaktionen finden chemische Reaktionen von Bestandteilen des Grundkörpers und/oder Gegenkörpers mit Bestandteilen des Schmierstoffs oder des Umgebungsmediums statt, und zwar infolge einer durch Reibung bedingten Aktivierung der beanspruchten oberflächennahen Bereiche durch Temperaturerhöhung sowie entstandenen Gitterfehlern. Die Reaktionsprodukte weisen gegenüber Grund- und Gegenkörper veränderte Eigenschaften auf. Die gebildeten Reaktionsschichten können sich sowohl positiv als auch negativ auswirken [Deters 2004].

Es ergeben sich ableitend folgende Vorteile bei der Verwendung von mehrschneidigen Fräsern. Sie sind vorteilhaft, weil:

- sie sich den Verschleiß teilen, wodurch der Fräser eine höhere Standzeit erreicht,
- der Fräser runder läuft als mit nur einer Schneide,
- Mehrschneider eine größere Querschnittsfläche als Einschneider haben und somit eine bessere Wärmeabfuhr über den Fräser erfolgt,
- durch mehrere Schneiden kleinere Späne und somit glattere Oberflächen entstehen.

Auf der anderen Seite haben weniger Schneiden Vorteile, weil:

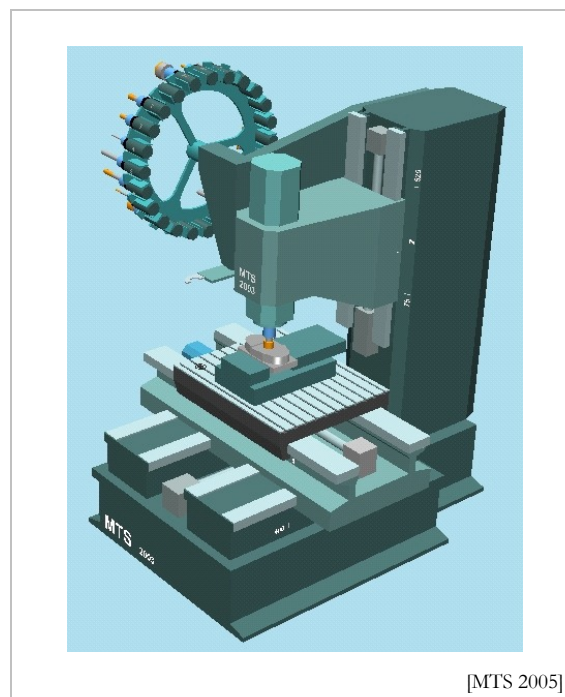
- sich der Fräser bei wenigen Schneiden nicht so schnell mit Spanmaterial zusetzt und verstopft, da eine größere offene Fläche (Spannut) vorhanden ist,
- durch wenige, spitze Schneiden ein leichteres Eintauchen in die Oberfläche des Materials ermöglicht wird.

Die Frage nach der bestgeeigneten Schneidengeometrie ist nur unter Betrachtung des zu bearbeitenden Werkstoffes zu lösen. Bei weichen Werkstoffen wie Kunststoffen, Holz oder Aluminium sind aufgrund der Verstopfungsgefahr in der Regel Einschneider im Vorteil, während bei harten Werkstoffen Dreischneider eingesetzt werden, da dort die Verstopfungsgefahr gegenüber dem Verschleiß zurücktritt.

Die wichtigsten eingesetzten Fräserarten sind dabei Messerköpfe, Schaftfräser, Torusfräser und Kugelfräser. Diese Fräser müssen bedingt durch ihren Anwendungsbereich, z.B. tiefe Gravuren in Gesenken und Formen, vielfach mit großem Schlankheitsgrad⁴ ausgelegt werden. Hierdurch treten zum einen abhängig von den Kontakt- und Eingriffsbedingungen bei der Bearbeitung Ratterschwingungen auf, die besonders bei harten, spröden Schneidstoffen zu erhöhtem Verschleiß durch Ausbrüche führen. Zusätzlich führen sowohl Rattervorgänge als auch eine Verbiegung der schlanken Werkzeuge zu Maß- und Formfehlern an den Bauteilen.

4.3 Werkzeugmaschine

Heutige CNC-Werkzeugmaschinen sind mit steuerbaren, automatischen Werkzeugwechseleinrichtungen ausgestattet. Je nach Bauart und Anwendungsbereich können diese Werkzeugwechseleinrichtungen unterschiedlich viele Werkzeuge gleichzeitig aufnehmen und das vom Programm jeweils aufgerufene Werkzeug in Start- und Arbeitstellung bringen (Abbildung 4-1).



[MTS 2005]

Abbildung 4-1: Aufbau einer Werkzeugmaschine

⁴ Verhältnis aus Werkzeuglänge zu Werkzeugdurchmesser

Unter CNC (Computerized Numerical Control) wird eine numerische Steuerung verstanden, die einen oder mehrere Mikroprozessoren für die Ausführung der Steuerungsfunktionen enthält. Das wesentliche Kennzeichen einer numerischen Steuerung ist die präzise Steuerung der Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück einer Maschine. Das Betriebssystem der Steuerung umfasst alle erforderlichen Funktionen, wie Lage- und Geschwindigkeitsregelung, Anzeigen und Editor, Datenverarbeitung usw. Zusätzlich bedarf es eines Anpaßprogrammes an die zu steuernde Maschine, welches der Maschinenhersteller erstellt und in der speicherprogrammierbaren Anpasssteuerung integriert. Darin sind alle maschinenbezogenen Verknüpfungen und Verriegelungen für spezielle Funktionsabläufe festgelegt, wie z.B. für Werkzeugwechsel und Achsbegrenzungen. Da alle heutigen CNC-Systeme nach diesem Grundprinzip aufgebaut sind und mindestens einen Mikroprozessor enthalten, sind die Begriffe NC und CNC als Synonyme zu betrachten [Kief 2005].

Sind die Datensätze für den Fräsvorgang erzeugt, müssen diese für die entsprechende Maschinensteuerung übersetzt werden. Dies leistet der Post-Prozessor der CAM (Computer Aided Manufacturing)-Software. Die Daten werden an die Maschine transferiert. Die anschließende Werkstückspannung muss nun so erfolgen, dass das Werkstück absolut spielfrei, lagerichtig und lagesicher den Bearbeitungskräften widersteht. Es gibt eine Vielfalt von Werkstück-Spannmitteln. Die Werkstückspannung soll einen möglichst schnellen, leicht zugänglichen und wiederholbaren Werkstückwechsel gestatten.

Für einfache Fräsarbeiten sind oft steuerbare, hydraulische Backenspannzeugen ausreichend. Bei allseitig zu bearbeitenden Frästeilen soll die Komplettbearbeitung mit möglichst wenig Aufspannungen erfolgen. Bei komplizierten Frästeilen werden Fräsvorrichtungen - auch mit automatischer Wendemöglichkeit - hergestellt oder aus vorhandenen Baukastensystemen zusammengestellt, so dass eine Komplettbearbeitung möglichst ohne Umspannen erreicht wird. Der Einsatz von Werkstückpaletten, die während des Fräsens außerhalb des Arbeitsraumes vom Bediener mit dem nächsten Frästeil bestückt werden und dann automatisch in die richtige Bearbeitungslage gefahren werden können, wird zunehmend angewendet.

Bei dem in dieser Arbeit verwendeten 3-Achs-Bearbeitungszentrum BAZ 15 CNC handelt es sich um eine Koordinatentisch-Maschine, d.h. es erfolgt eine XY-Bewegung des Werkstückes und eine Z-Bewegung des Werkzeuges. Die Größe des Bauraums beträgt $X = 600 \text{ mm}$, $Y = 400 \text{ mm}$ und $Z = 600 \text{ mm}$.

4.4 Schnittbedingungen

Die Ermittlung der optimalen Schnittwerte ist nicht nur zur Reduzierung der Fertigungszeit nötig, sondern notwendig, um eine entsprechende Oberflächengüte zu erzielen. Das geschieht außer durch Reduzieren der Rüst-, Neben- und Werkzeugwechselzeiten durch optimales Auslegen des Zerspanungsprozesses, d.h. durch Optimierung folgender Parameter (vgl. Kapitel 3.3):

- Schnitttiefe a_p (Schrittweite s_w)
- Vorschub v_f
- Schnittgeschwindigkeit v_c
- Vorschub pro Zahn f_z
- Drehzahl n

Wie bereits in Kapitel 3.3 ausgeführt, werden Angaben zum Fräsen von Werkstoffen (fast) immer über die Schnittgeschwindigkeit gesteuert. Mit höherer Schnittgeschwindigkeit steigt zwar die Güte der Oberfläche, allerdings wächst auch der Verschleiß des Fräasers (siehe Kapitel 4.2). Zu geringer Vorschub führt dazu, dass die Schneiden nicht genügend ins Material eindringen. Zu hoher Vorschub führt hingegen zum Bruch des Fräasers aufgrund eines zu großen Biegemoments. Eine zu große Schnitttiefe führt zwar zu mehr Materialabtrag, bewirkt aber eine höhere Belastung des Fräasers und verursacht eine schlechtere Oberflächengüte.

Zerspanungsrichtwerte, wie sie z.B. vom Verein Deutscher Ingenieure (VDI) für die verschiedenen Bearbeitungsverfahren als so genannte VDI-Richtlinien herausgegeben werden, geben dem Arbeitsplaner in der Regel nur sehr grobe Anhalteswerte für die Schnittwertvorgabe [König 1990].

Die Wahl eines geeigneten Kühlschmierstoffes sollte ebenfalls berücksichtigt werden. Der Kühlschmierstoff hat folgende Aufgaben:

- Wärme abführen
- Reibung vermindern
- Transport der Späne unterstützen
- Standzeit des Werkzeugs erhöhen
- Oberfläche des Werkstücks verbessern

Kühlschmierstoffe bestehen meistens aus einer Wasser-Öl Emulsion, welche in einem geschlossenen Kreislauf zirkuliert. Der in dieser Arbeit verwendete wassermischbare Kühlschmierstoff der Firma Fuchs trägt die Bezeichnung EcoCool 2520.

4.5 Bearbeitungsstrategie

Im Allgemeinen setzt sich die Fräsbearbeitung aus verschiedenen Arbeitsprozessen zusammen: dem Schrappen und dem Schlichten. Zunächst wird beim Schrappen die grobe Kontur des zu fertigenden Bauteils herausgearbeitet, wobei in kurzer Zeit große Volumina zerspannt werden. Durch ein sorgfältig an die Geometrie angepasstes Ausräumen kann z.T. auf weitere Vorschlichtoperationen verzichtet werden.

Danach folgt in einer Schlichtbearbeitung die Verfeinerung der geschrappten Struktur. Durch das Schlichten der Oberflächen soll die Endkontur mit möglichst hoher Genauigkeit und Qualität gefertigt werden. Dabei können Schrappen und Schlichten wiederum aus mehreren Einzelschritten bestehen, die sich sowohl in den zu fertigenden Geometrieelementen als auch in den verwendeten Werkzeugen und Schnittwerten unterscheiden können. Für eine konkrete Fräsaufgabe gibt es somit eine Vielzahl von Möglichkeiten, die Bearbeitung in verschiedene Teilvorgänge zu untergliedern. Diese Zerlegung einer Fräsaufgabe in eine Abfolge einzelner Arbeitsschritte wird als Frässtrategie bezeichnet und übt erheblichen Einfluss auf Bearbeitungsdauer und Ergebnisgüte aus.

Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen an die beiden Teilschritte sind spezielle Bearbeitungsstrategien (Abbildung 4-2) sowohl für das Schrappen als auch das Schlichten entwickelt worden, die vom Anwender in Abhängigkeit von der jeweiligen Oberflächentopographie der zu erzeugenden Form ausgewählt werden müssen (Kief 2005, siehe auch Kapitel 5).

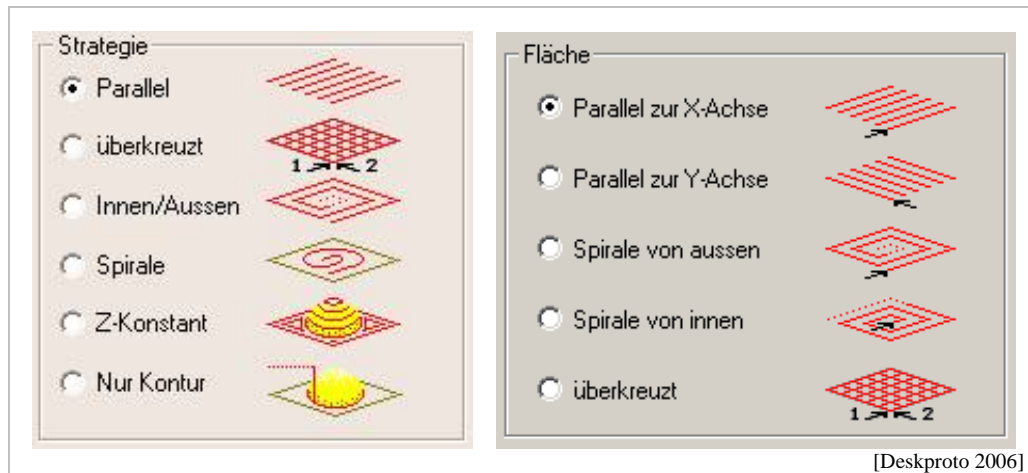


Abbildung 4-2: Auswahl an Bearbeitungsstrategien

Wie in Abbildung 4-2 zu erkennen ist, zeigt die Auswahl an Bearbeitungsstrategien, dass es keine einheitliche Sprachregelung für die verschiedenen Bearbeitungsstrategien in den CAM-Modulen gibt. Zum besseren Verständnis sollen diese Bearbeitungsstrategien im Folgenden kurz erläutert werden:

(1) Parallel, Parallel zur X- bzw. Y-Achse, Zick

Der Fräser verfährt in der XY-Ebene, fährt im Eilgang zurück und fährt, versetzt um eine Schrittweite, erneut parallel in der XY-Ebene oder auch (2)

(2) Zick Zack, Mäander, Ebene

Der Fräser verfährt in der XY-Ebene und fährt, versetzt um eine Schrittweite, wieder parallel in der XY-Ebene zurück usw.

(3) Überkreuzt, Kreuz

Kombination aus (1) und (2)

(4) Innen/Außen, Tasche nach Innen/Außen

Der Fräser fährt vom Zentrum der Geometrie eine rechteckige Spirale von innen nach außen oder von außen nach innen

(5) Spirale, Spirale von (nach) Innen/Außen

Der Fräser fährt vom Zentrum der Geometrie kreisförmig von innen nach außen oder von außen nach innen

(6) Schnitt

Entspricht (1) und (2), Bezeichnung bei 3D-Geometrien

(7) Z-Konstant, Z-Ebene, Konturen

Werkzeugwege mit konstanter Z-Höhe (Schnitttiefe, Schrittweite) entlang der Kontur einer Geometrie

Die Untersuchung des Einflusses der Strategien ist Bestandteil dieser Arbeit.

4.6 Tabelle der Einflussparameter

Zusammenfassend seien in Tabelle 4-1 die einzelnen Einflussfaktoren an ein optimiertes Fräsen aufgezeigt. Im Fokus dieser Untersuchung stehen die Schnittbedingungen und die Strategien. Die Ergebnisse beziehen sich primär auf das Schlichten, da dieser Bearbeitungsschritt maßgeblich die Oberflächengüte des Werkstoffes wiedergibt.

Werkstück	Werkzeug	Werkzeugmaschine	Schnittbedingungen	Strategien
Werkstoff	Fräserarten z.B. Schaft - Kugel- fräser	3-Achs-Fräse	Schnitttiefe a_p	Bearbeitungsstr. z.B. Spirale
Festigkeit		Dynamik	Vorschub v_f	
Gestalt	Ein- und Zwei- schneider	Spannelemente	Schnittgeschwindigkeit v_c	Frässtr. z.B. Schruppen, Schlichten
Abmessungen	Durchmesser		Vorschub pro Zahn f_z	
Stabilität	Verschleiß		Drehzahl n	

Tabelle 4-1: Tabelle der Einflussparameter

In der vorliegenden Arbeit werden unterschiedliche Geometrien (Gestalt) anhand von PMMA und PC (Werkstoff) mit unterschiedlichen Fräsern sowie unterschiedliche Strategien untersucht. Die dazu notwendigen Schnittparameter werden ermittelt und dokumentiert. Die zur Verfügung stehenden Bearbeitungsstrategien sind dabei abhängig von dem eingesetzten CAM-Modul.

5 Einsatz geeigneter NC-Softwaremoduln

Für die NC-Programmierung in Verbindung mit CAD-Systemen bestehen prinzipiell zwei Möglichkeiten [Kief 2005]:

- Die Programmierung direkt im CAD-System (CAD-intern), oder
- die Programmierung über ein separates NC-Programmiersystem unter Verwendung der Geometriedaten aus dem CAD-System (CAD-extern).

Sind die Strategien zum Schruppen und Schlichten erzeugt, müssen diese, wie bereits in Kapitel 4 beschrieben, für die entsprechende Maschinensteuerung übersetzt werden. Dies leistet der Post-Prozessor der entsprechenden eingesetzten Software.

5.1 CAD-interne NC-Programmierung

Die Zusammenfassung von CAD und CAM zu CAD/CAM soll den Informationsfluss von der Projektierung eines Erzeugnisses bis zu seiner Fertigstellung rationalisieren, indem die mit CAD-Systemen erzeugten und gespeicherten Daten möglichst direkt weiterverwendet und mehrfach genutzt werden. Diese Variante ist dann von Vorteil, wenn nahezu das gesamte NC-Programm durch geometrische Algorithmen aus den CAD-Daten abzuleiten ist. Dies trifft besonders bei 3D-Freiformflächen zu.

In modernen 3D-CAD-Systemen lassen sich bereits CAM-Moduln zur NC-Programmierung direkt implementieren. Diese Systeme nutzen die grafischen Elemente des CAD-Systems und erlauben eine Zuordnung von Bearbeitungsvorgängen zu einzelnen Bauteilflächen. Ohne die Überführung in andere Datenformate wird die Geometrie der Bauteile der NC-Programmierung in der höchstmöglichen Genauigkeit übermittelt. In der Regel ermöglichen die CAM-Moduln auch eine Simulation der Bearbeitung mit Berücksichtigung der Werkzeuggeometrie, die im Vorfeld der Fertigung beispielsweise eine Kontrolle hinsichtlich Restmaterial und Fertigungsdauer erlauben.

5.2 Einsatz von CAMWorks 2004 Plus

TekSoft [TekSoft 2005] ist Entwickler von leistungsstarken, bedienungsfreundlichen, auf Windows basierten CAD/CAM-Softwarelösungen. CAMWorks ist eine voll integrierte CAM-Lösung, die ausschließlich für den Einsatz in der SolidWorks-Umgebung konzipiert wurde. Aufgrund dieser engen Integration verwendet CAMWorks dieselbe SolidWorks-Geometrie zum Generieren von Werkzeugwegen, damit sichergestellt ist, dass das maschinell bearbeitete Bauteil auch dem modellierten Bauteil entspricht. Darüber hinaus entfallen die umständlichen und mit Verlusten versehenen Dateitransfers (siehe Seite 10 u. Kapitel 5.3).

Bei der NC-Generierung wird folgende Vorgehensweise gewählt:

1. **Bauteil modellieren oder vorhandenes Modell öffnen/importieren**
2. **Werkstück definieren** (z.B. das Begrenzungsfeld)
3. **Maschinenparameter definieren** (Auswahl eines Bearbeitungszentrums und Steuerung)
4. **Feature erzeugen**

Neben der automatischen Feature-Erkennung für Taschen, Bohrungen usw. können diese auch manuell erzeugt werden. Der Vorteil ist dabei die größere Bewegungsfreiheit für den Anwender. Dieser kann durch An- und Abwahl der Flächen bestimmen, welche Flächen bearbeitet werden sollen und welche nicht. Ebenso bestimmt der Anwender, ob es sich dabei um ein 2,5D⁵ oder 3D⁶-Feature handelt und ob diese Flächen geschruppt oder geschlichtet werden sollen. Letzteres entscheidet über die zur Verfügung stehenden Bearbeitungsstrategien. Die automatische Feature-erkennung legt zudem nur 2,5D-Geometrien an. 3D-Geometrien müssen interaktiv erzeugt werden.

In der Abbildung 5-1 ist die Benutzeroberfläche des CAM-Moduls mit geladenem Bauteil dargestellt. Zu sehen sind die ausgewählten Flächen, die bearbeitet werden sollen. Die rot markierten Flächen sind von der Bearbeitung ausgenommen.

⁵ Zweidimensionale Geometrie mit konstantem Z-Wert z.B. eine Bohrung

⁶ Dreidimensionale Geometrie z.B. eine Kugel

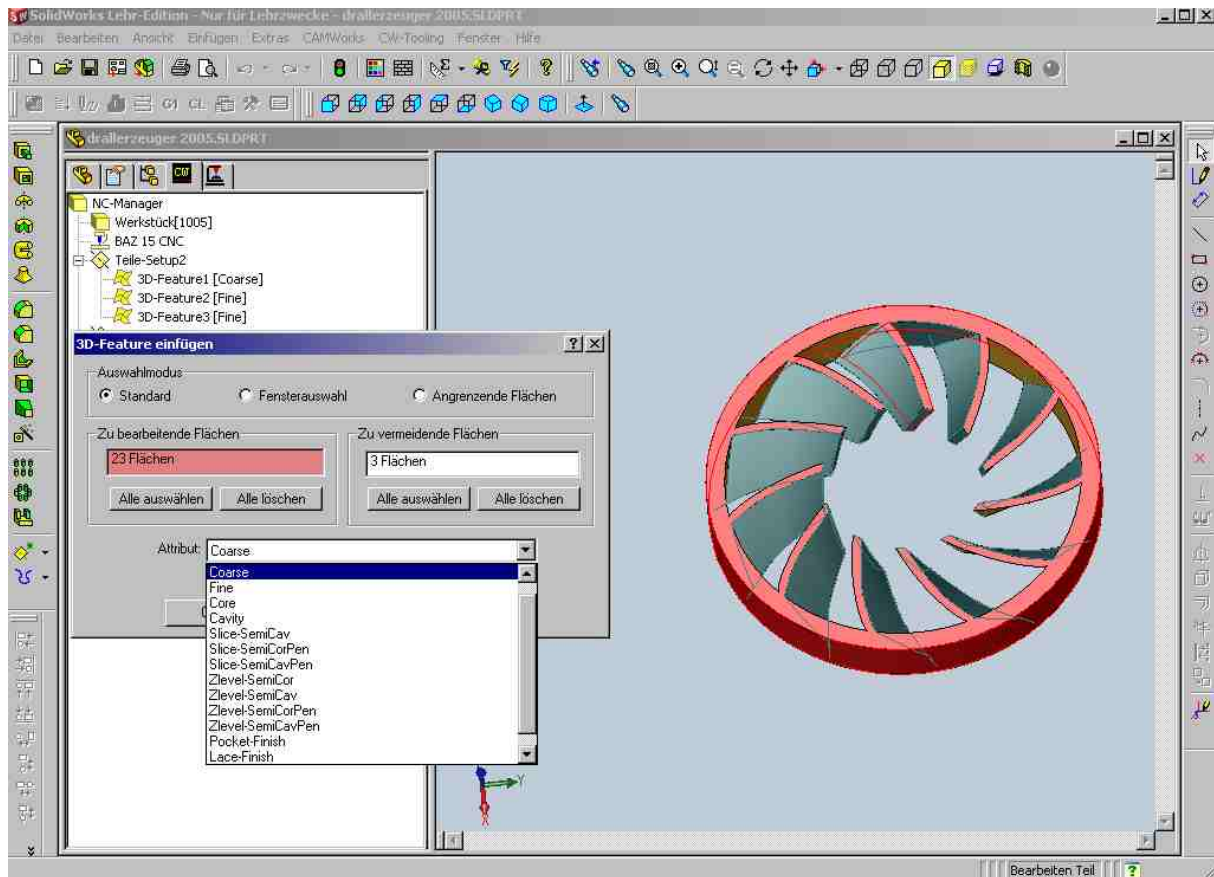


Abbildung 5-1: Benutzeroberfläche CAMWorks

Im Anschluss an die Schritte eins bis vier werden die folgenden Punkte abgearbeitet:

5. Arbeitsplan Erzeugen

Hier werden die Bearbeitungs-Operationen (Strategien, Werkzeuge usw.) erzeugt und in der Operationsstruktur unter dem entsprechenden Teile-Setup abgelegt. In der CAMWorks-Operationsstruktur ist nun eine Liste von Bearbeitungsvorgängen vorhanden.

6. Parameter, Teile -Setup

Hier kann z.B. der Nullpunkt definiert und die Orientierung der Achsen festgelegt werden.

7. Werkzeuge erzeugen

Hier werden die Werkzeugwege aufgrund der bisherigen Einstellungen erzeugt.

8. Werkzeugparameter einstellen oder ändern

Bei jedem Bearbeitungsfeature kann das Werkzeug, die Strategie oder Vorschub und Drehzahl verändert werden. Der Dialog für alle Parameter, welche den Werkzeugpfad definieren, erlaubt spezifische Einstellungen für die Bearbeitung vorzunehmen (Art der Bearbeitung, Aufmaß, Vorschub usw.). Abbildung 5-2 zeigt diese Einstellungsmöglichkeiten.

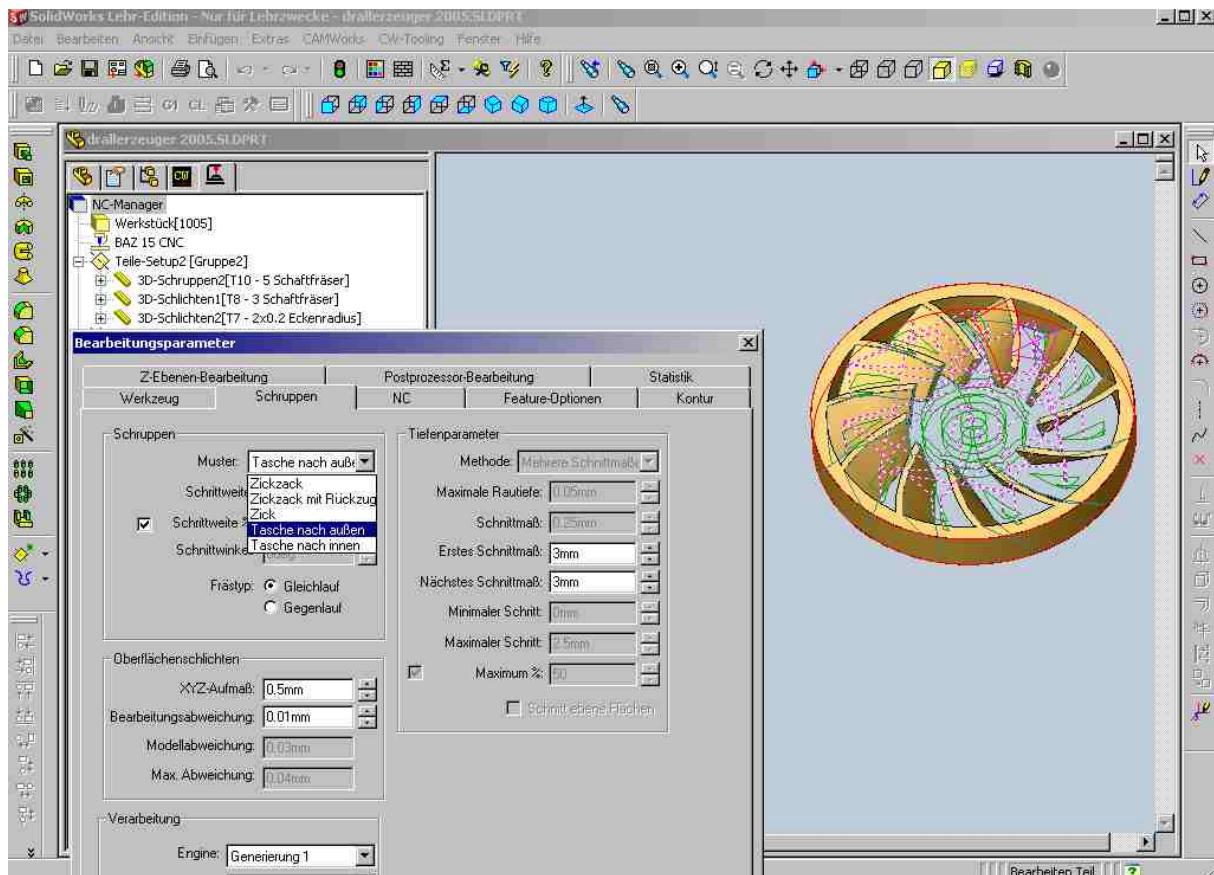


Abbildung 5-2: Einstellungsmöglichkeiten CAMWorks

9. Simulation

Es lassen sich über die Simulation fehlerhafte Werkzeugwege erkennen und beheben. Falls die Wege nicht überprüft werden, kann dies zu Kollisionen führen und Fräser und/oder Werkstück beschädigen. Abbildung 5-3 auf der nächsten Seite zeigt den Simulationsvorgang (Schruppen mit einer Schrittweite s_w /Schnitttiefe a_p von 3 mm).

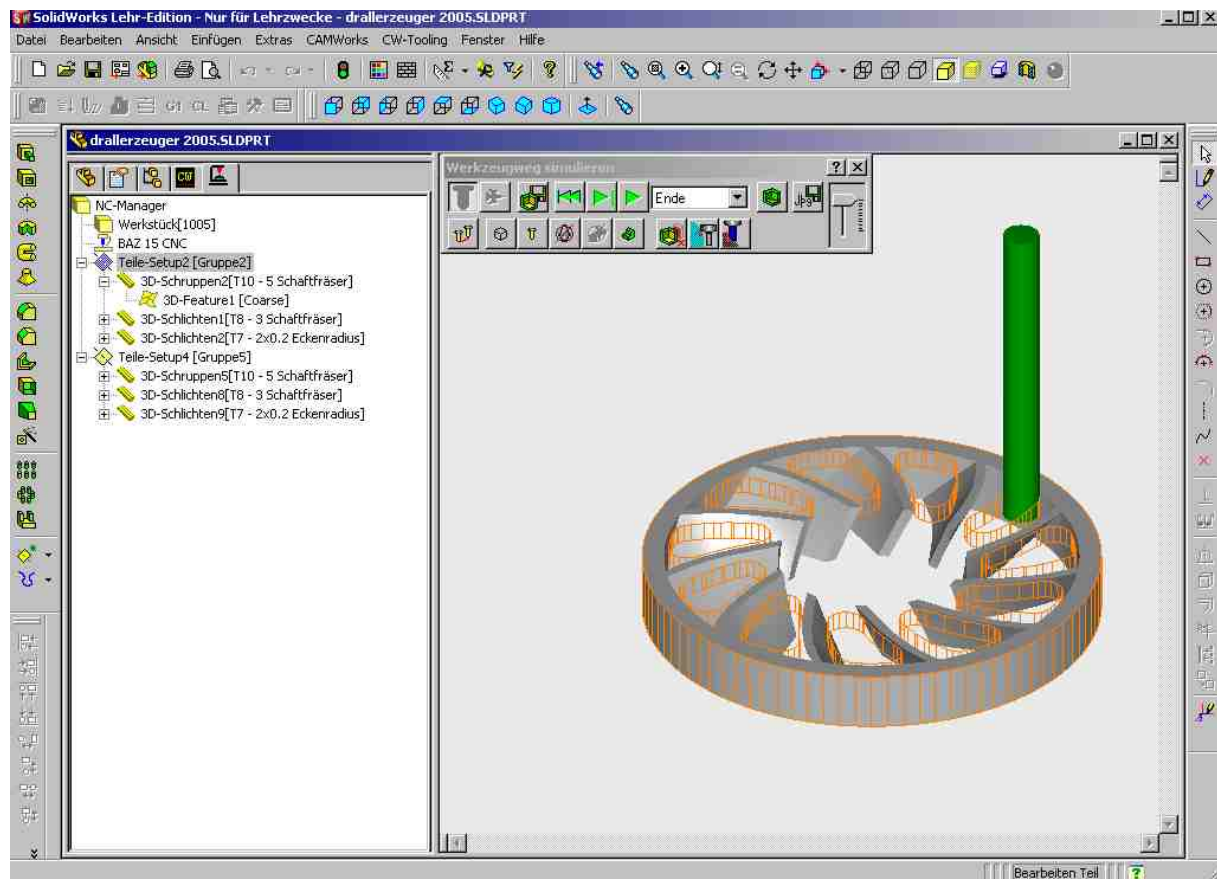


Abbildung 5-3: Simulation CAMWorks

10. Post-Prozess

In einem letzten Schritt werden die Werkzeugwege (maschinenlesbare Daten) erzeugt.

Nachteil bei der Verwendung des Moduls ist, dass das System jedoch nicht in der Lage ist, die komplexen Körper aufgrund von Hinterschnidungen automatisch in zu fertigende Einzelkörper zu teilen. Die Prozedur der Erzeugung von Schichten muss daher manuell erfolgen, was ein hohes Maß an Erfahrung erfordert.

5.3 CAD-externe NC-Programmierung

Programme wie DeskProto oder Millit sind NC-Programmiersysteme zum automatischen Erzeugen der NC-Code für 3-Achs-NC-Maschinen. Ausgangspunkt ist dabei eine 3D-Datei, zumeist im STL-Format. Dieser Datentyp wird von fast allen modernen 3D-CAD-Systemen erzeugt und bietet einen problemlosen Datenaustausch. Nachdem sämtliche Einstellungen vorgenommen worden sind, berechnet das Programm automatisch die Werkzeugwege und den kompletten NC-

Code. Dank integrierter Post-Prozessoren steht sofort ein NC-Programm im Maschinenformat bereit.

5.4 Einsatz von Millit

Die Software Millit wird von der COSCOM Computer GmbH vertrieben. Die Arbeitsweise soll kurz zum besseren Verständnis beschrieben werden, damit der Unterschied zu dem Modul CAMWorks deutlich wird. Die Windows-Anwendung arbeitet wie folgt:

1. Anlegen eines Projektes

Der Benutzer legt ein neues Projekt an, wobei er unter anderem vorgibt, in welchen Plattenstärken und Abmessungen das Ausgangsmaterial vorliegt. Hier können allerdings keine runden, sondern nur rechteckige Blockformen definiert werden.

2. Importieren eines STL-Datensatzes

3. Bauteil automatisch (oder manuell) schneiden

Millit ist in der Lage, Hinterschnidungen zu erkennen. Nach dem automatisch ablaufenden Schnittvorgang kann der Benutzer mit einem 3D-Betrachter die erzeugten Teile kontrollieren und nicht gewünschte Schnitte durch manuelles Zuschlagen korrigieren. Dadurch lässt sich jedes einzelne Teil durch beidseitiges Fräsen aus dem Ausgangsmaterial herausarbeiten.

4. Rahmen erzeugen

5. Bauteile in den Rahmen legen

Dem Modell der Rahmen werden Stege hinzugefügt, die die in den Rahmenausschnitten liegenden Teile mit dem Rahmen verbinden und beim Fräsen stehen bleiben. Das Ausgangsmaterial wird jeweils mit zwei Systembohrungen versehen, die sich auf der Mittelachse (Wendeachse für das Fräsen der Rückseite) dort befinden, wo später der Rand des Rahmens stehen bleibt.

6. Erzeugung technologische Informationen

Die für die Generierung der NC-Programme notwendigen technologischen Informationen (Maschinenparameter, Werkzeuge, Schrittweiten, Drehzahlen, Frässtrategien etc.) werden dabei vom

In Abbildung 5-4 ist die Bedieneroberfläche von Millit dargestellt. Ein Nachteil ist, dass das Zerspanungsvolumen verhältnismäßig groß und die eingeschränkte Abführung der Späne aufgrund der Wannenform zu einer stärkeren Werkzeugbelastung und damit zu kürzeren Standzeiten führen können. Nicht zuletzt können die nicht abgeführten Späne zu einer unkontrollierten Schleifwirkung der Bauteiloberfläche führen und dadurch Ungenauigkeiten bzw. Schäden am Bauteil hervorrufen. Weiterhin ist der Anwender zum größten Teil auf der Verwendung von Stützstegen angewiesen. Diese können nur entfallen, wenn ein rechteckiger Block gewählt wird, aus dem eine Innenkontur herausgearbeitet werden muss. Bei einem runden Bauteil, wie in Abbildung 5-4 dargestellt, muss dieses aus dem eckigen Rohmaterial herausgearbeitet werden. Daher sind immer Stützstege notwendig. Ein weiterer Nachteil ist, dass für den Schrappvorgang nur eine Bearbeitungsstrategie zur Verfügung steht. Die reduzierte Strategiewahl, im Vergleich zu dem Modul CAMWorks, gilt auch für das Schlichten (siehe Abbildung 5-4). Einzelne Bearbeitungsstrategien können zudem nicht einzelnen Formelementen, wie einem Zylinder, zugeordnet werden, d.h. auch die Selektierung einzelner Flächen ist nicht möglich. Daher ist der Anwender in Summe bei der Verwendung von Millit sehr stark eingeschränkt. Die geringe Auswahl und unzureichende Einstellmöglichkeit der Bearbeitungsstrategien können daher zu suboptimalen Ergebnissen hinsichtlich der hohen Anforderungen an die Oberflächenqualität der zu bearbeitenden Strukturen führen.

Vorteil der Software ist, dass Hinterschneidungen von Bauteilen selbstständig erkannt und diese an den entsprechenden Stellen geschnitten werden.

6 Experimentelle Untersuchung der Einflussparameter

In diesem Kapitel werden die für ein optimiertes Fräsen beeinflussenden Parameter untersucht. Die Untersuchung erfolgt zuerst anhand von 2,5D-Geometrien, in einem zweiten Schritt anhand von 3D-Geometrien.

6.1 Untersuchung geeigneter Probekörper

Als CAM-Modul wurde die Software CAMWorks eingesetzt (siehe Kapitel 5.2). Die Ergebnisse der Untersuchung sollen später auf Praxisbeispiele übertragen werden.

6.1.1 Untersuchung von 2,5D-Formelementen mit CAMWorks

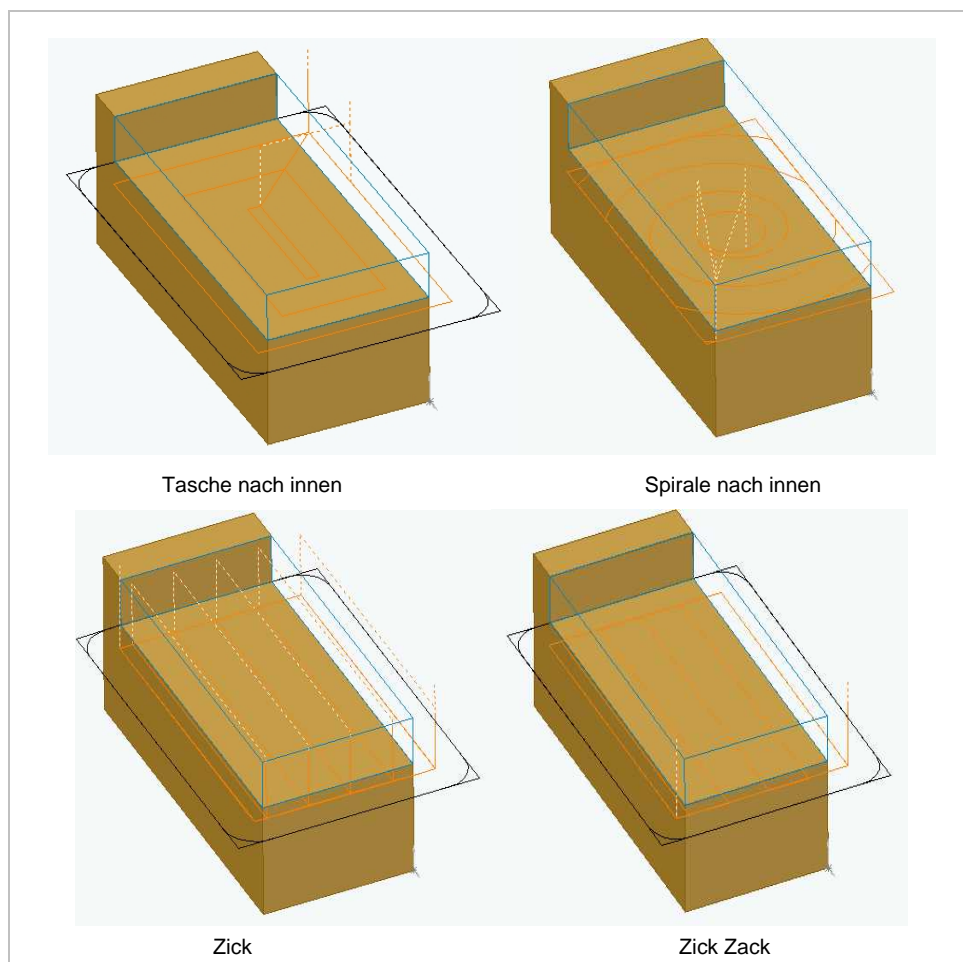
In einer ersten Untersuchung [Raab 2004] wurden Versuchsreihen gefahren, um die Problemstellungen beim Fräsen von transparenten Kunststoffen aufzuzeigen. Die Versuche wurden mit Plexiglas durchgeführt. Ziel der Versuche war es, erste Einflussgrößen auf die Qualität der zu fertigenden Geometrien zu ermitteln.

Die Variationsmöglichkeiten der Parameter wurden einerseits durch die maximal mögliche Leistung von Fräser und Bearbeitungszentrum und andererseits durch die minimal nötige Bearbeitungsleistung begrenzt. Bei der Schnitttiefe a_p war der Maximalwert beispielsweise durch die Festigkeit des Fräasers bestimmt, während ein gewisser Minimalwert nicht unterschritten werden durfte, weil sonst der Fräser nicht genügend ins Material eingreift, um einen Schnitt ausführen zu können. In den ersten Versuchsreihen wurde das Variationsspektrum der betrachteten Einflussparameter zunächst anhand einfacher Geometrien untersucht. Die Dokumentation der durchgeführten Fräsoperationen erfolgte anhand Tabelle 6-1.

Parameter	
Fräser Ø (mm) u. Typ	2 u. 8, Einschneider
n (1/min)	1000, 4000, 9000
v_f (mm/min)	50, 500, 1000
v_z (mm/min)	20, 200, 400
a_p (mm)	0,5 / 2 / 3 / 6
Strategien	Tasche nach innen, Zick, Zick Zack, Spirale nach innen
Fräsen	Gleich- oder Gegenlauf

Tabelle 6-1: Beispiel Versuchsreihe 1 (Wertebereiche)

In den Versuchsreihen wurden als Probekörper 45 x 20 x 20 mm große Blöcke verwendet, von denen eine 40 x 20 mm große Fläche bis zu 6 mm tief plangefräst wurde. In Abbildung 6-1 sind unterschiedlichen Bearbeitungsstrategien dargestellt. Die plangefräste Fläche des zu bearbeiteten Körpers wurde zur Beurteilung der erzielten Transparenz verwendet.


Abbildung 6-1: Probekörper mit Bearbeitungsstrategien

Untersucht wurden zuerst 19 Proben der dargestellten Geometrie. Als Werkstoff wurde gegossenes Plexiglas verwendet. Durch eine Variation der Einflussgrößen können so erste Aussagen getroffen werden. Im Anschluss wurden die Versuche (Versuchsreihe 2) wiederholt, in diesem Fall mit extrudiertem Plexiglas. Hiermit sollte die Frage beantwortet werden, ob es qualitative Unterschiede im Ergebnis gibt. Die durchgeführten Untersuchungen ergaben, dass zum einen die Verwendung von gegossenen oder extrudierten Plexiglas nahezu identische Ergebnisse lieferte. Die Transparenz war bei beiden gleich, dass gegossene Plexiglas schien, je nach Eingriff, ein wenig empfindlicher zu sein.

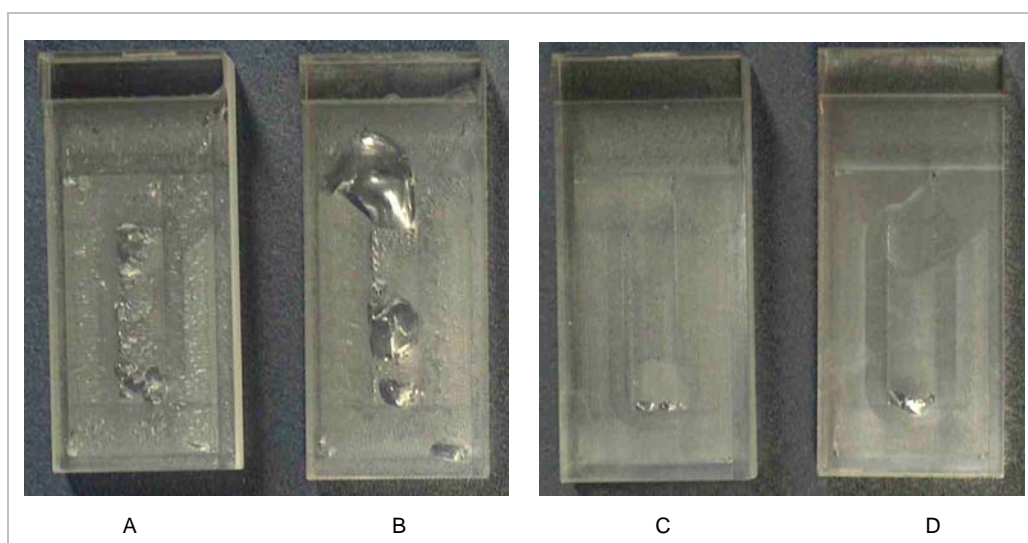


Abbildung 6-2: Ergebnisse der Versuchsreihen 1 und 2

Wie in Abbildung 6-2 zu erkennen ist, entstehen auf den Oberflächen der Probekörper starke Ausbrüche sowie Rattermarken. Dies konnte auf eine niedrige Drehzahl (niedrige Schnittgeschwindigkeit) und die Strategie zurückgeführt werden, da bei der Strategie Tasche nach innen das Werkzeug abrupte Richtungsänderungen vollführt und somit Material herausgerissen wird. Bei Änderung der Strategie nach Zick konnte das Bauteil ohne Ausbrüche plangefräst werden. Eine vollständige Transparenz konnte allerdings nicht erzielt werden. Die aus den Versuchen resultierenden Erkenntnisse sind in Tabelle 6-2 dargestellt.

Parameter	Beobachteter Effekt	Schlussfolgerung
Fräser	bei geringeren Fräserdurchmessern ist die Schlierenbildung sowie Bearbeitungsdauer höher	den maximal möglichen Fräserdurchmesser verwenden
n (1/min)	geringere Drehzahl erzeugt Rattermarken auf der Werkstücksoberfläche und eine schlechtere Oberflächenqualität	bei jeder Bearbeitung die maximale Spindeldrehzahl verwenden
v_f (mm/min)	geringerer Vorschub erhöht die Oberflächenqualität und Transparenz, aber auch die Bearbeitungsdauer	der Vorschub ist auf die angestrebte Oberflächengüte abzustimmen
a_p (mm)	größere Schnitttiefen erhöhen das Zeitspanvolumen, verschlechtern allerdings die Transparenz und führen in der Regel zu Ausbrüchen	in nachfolgenden Versuchsreihen ist zu prüfen, ob bei hohen Schnitttiefen eine mehrstufige Bearbeitung ratsam ist
Strategie	<i>Tasche</i> , <i>Zick Zack</i> und <i>Spirale</i> führen zu stärkeren Schlieren auf der Oberfläche, da der Fräser dort (abrupt) Richtungswechsel fährt, zudem Ausbrüche	vorwiegend die Bearbeitungsstrategie <i>Zick</i> verwenden
Fräsen	Gegenlaufräsen erzeugt größere Ausbrüche als Gleichlaufräsen sowie stärkere Schlieren	Gleichlaufräsen ist dem Gegenlaufräsen vorzuziehen

Tabelle 6-2: Ergebnisse Versuchsreihen 1 und 2

Die aus den Versuchsreihen gewonnen Erkenntnisse belegen weiterhin, dass eine langsame Vorschubgeschwindigkeit und eine geringe Schnitttiefe zwar Oberflächenqualität und Transparenz fördern, die Bearbeitungsdauer aber erheblich steigt.

In einer weiteren Versuchsreihe wurden 18 Versuche an der gleichen Geometrie gefahren, um den Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit und der Mindestspantiefe zu untersuchen. Weiterhin sollte die Frage beantwortet werden, wie am sinnvollsten 6 mm Material zu zerspanen sind. Dabei wurde der Fräser nicht variiert.

Parameter	
Fräser Ø (mm) u. Typ	6, Einschneider
n (1/min)	9000
v_f (mm/min)	25 - 1000
a_p (mm)	0,25 / 0,5 / 1 / 1,5 / 2 / 3 / 4 / 6
Strategie	Zick

Tabelle 6-3: Beispiel Versuchsreihe 3 (Wertebereiche)

Die Auswertung der unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten v_f zeigen, dass für eine Schnitttiefe a_p von 3 mm eine effiziente Vorschubgeschwindigkeit zwischen 200 und 300

mm/min liegt (siehe Abbildung 6-3, Bild C / $v_f = 225$ mm/min). Anhand der weiteren Proben konnte der optimale Vorschub zwischen 200 und 275 mm/min eingegrenzt werden. Ein empfohlener Vorschub ist 250 mm/min. Mit niedrigeren Vorschubgeschwindigkeiten konnte zwar noch eine bessere Transparenz erzielt werden (Abbildung 6-3, Bild B / $v_f = 75$ mm/min), allerdings sprechen die wesentlich höheren Bearbeitungszeiten (bis zu Faktor 8) gegen die Verwendung dieser Schnittparameter. Auch hier muss vom Anwender ein Kompromiss gefunden werden. Zu hohe Vorschubgeschwindigkeiten führen zu einer milchigen Oberfläche (Abbildung 6-3, Bild A / $v_f = 1000$ mm/min), da die Drehzahl im Verhältnis zur Vorschubgeschwindigkeit zu niedrig sind. Weiterhin zeigen die Proben, dass die ermittelten Vorschubgeschwindigkeiten auch bei kleineren bzw. größeren Schnitttiefen vergleichbare Resultate erzielen. Zudem wurde durch die Proben belegt, dass bei der maximalen Schnitttiefe von 6 mm ein geringerer Vorschub keine sichtliche Verbesserung bewirkt.

Die Untersuchung der Mindestspantiefe zeigt, dass zu geringe Schnitttiefen bzgl. der Transparenz eine schlechte Oberfläche zur Folge haben. Erst ab einer Schnitttiefe von 1 mm konnte eine zufrieden stellende Transparenz erzielt werden. Daher ist eine Mindestspantiefe von 1 mm nicht zu unterschreiten.

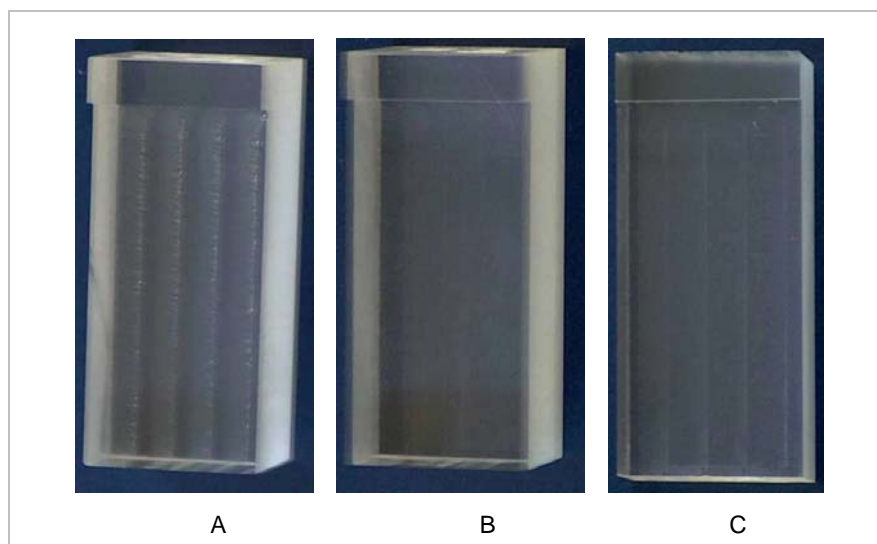


Abbildung 6-3: Ergebnisse Versuchsreihe 3

In der vierten und letzten Versuchsreihe (35 Probekörper) wurde eine komplexere Geometrie gewählt, um den Einfluss der Fräs- und Bearbeitungsstrategien genauer zu untersuchen. In Abbildung 6-4 sind die beiden Geometrien dargestellt.

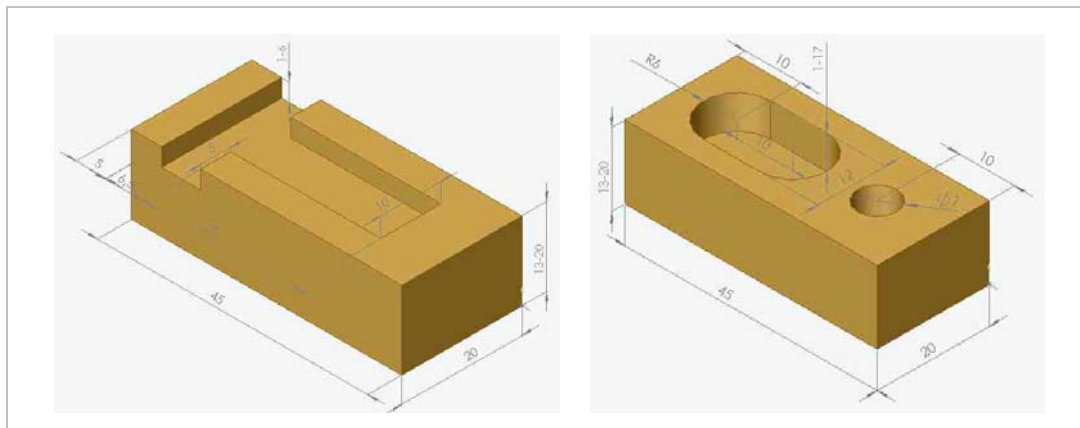


Abbildung 6-4: Geometrie der Probekörper Versuchsreihe 4

Dabei wurde im Zuge dieser Versuchsreihe die so genannte "mehrstufige Frässtrategie" verwendet (Abbildung 6-5). Während normalerweise in dem verwendeten CAM-Modul jedes Formelement anhand einzelner Flächen bestimmt und definiert werden kann, ist es durchaus sinnvoll, ein Formelement zu unterteilen. Der Vorteil besteht darin, dass dadurch die Fräswege unterschiedlich angelegt werden können. Zudem kann jeder Fläche eine andere Strategie zugewiesen werden. Somit lassen sich wesentlich komplexere Fräs- und Bearbeitungsstrategien realisieren als standardmäßig verfügbar sind. Es kann darüber hinaus durch das Einfügen weiterer Skizzen der Bereich der zu fräsenden Fläche bzw. Kontur verkleinert bzw. vergrößert werden.

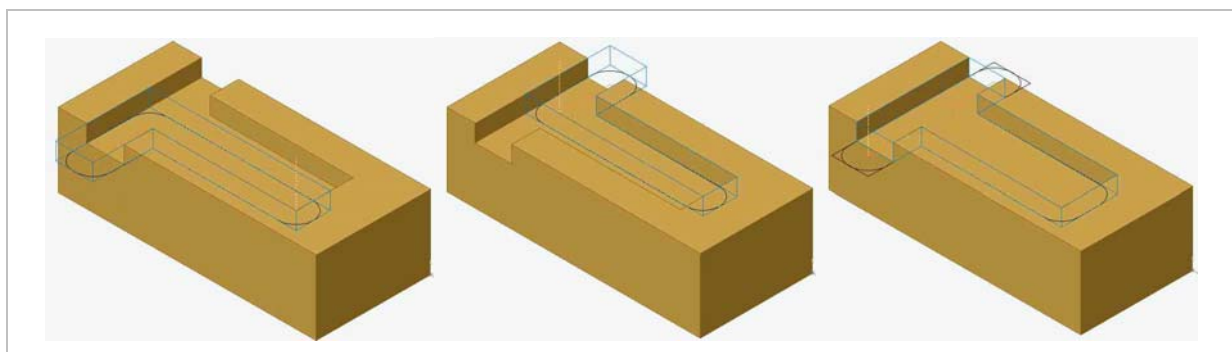


Abbildung 6-5: Dreistufige Frässtrategie

Durch Erfahrung lässt sich dieser Vorgang beeinflussen, indem die Strategie in z.B. drei Strategien aufgeteilt wird. Wie Abbildung 6-5 zeigt, wurde zudem noch die scheinbar zu bearbeitende Kontur vergrößert. Dadurch lässt sich gewährleisten, dass der Fräser von außen in die Kontur fährt, und nicht von oben eintaucht. Zusätzlich lässt sich dieses auch durch die An- und Ab-

fahrtsstrategie steuern. Die Abdrücke des Fräasers auf der Werkstückoberfläche werden dadurch reduziert.

Parameter	
Fräser Ø (mm) u. Typ	5, 6, Einschneider
n (1/min)	9000
v_f (mm/min)	50, 200, 500
a_p (mm)	3, 6
Strategie	Zick, Zick Zack, Tasche nach innen (außen)

Tabelle 6-4: Beispiel Versuchsreihe 4 (Wertebereiche)

Durch die Versuchsreihe konnte belegt werden, dass die bisher ermittelten Bearbeitungsparameter vergleichbare Ergebnisse liefern. Allerdings treten bei beiden Formelementen unterschiedliche Probleme auf. Bei der Nut-Geometrie kann mit den Standardstrategien zwar eine zufrieden stellende Transparenz erzielt werden, dabei treten aber unerwünschte Ausbrüche an den Kanten beim Fräseraustritt auf (Abbildung 6-6). Damit wäre dieses Bauteil nicht mehr zu verwenden. Erst durch Anwendung einer auf die vorhandene Geometrie abgestimmte, mehrstufigen Strategie (Anfahren von außen in das Werkstück) konnten diese Ausbrüche vermieden werden. Dabei haben sich auch in diesem Fall die Bearbeitungsstrategie *Zick* sowie eine Vorschubgeschwindigkeit von 250 mm/min als vorteilhaft erwiesen.

Das Formelement Bohrung führte hingegen zu dem Problem, dass der Fräser am Eintrittspunkt starke Schlieren verursacht. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Fräser aufgrund der geschlossenen Zielkontur nicht von der Seite in das Werkstück eindringen kann.



Abbildung 6-6: Ergebnisse Versuchsreihe 4

Es konnte im Rahmen dieser Versuchsreihe beobachtet werden, dass bei einigen Proben eine wesentlich schlechtere Transparenz erzielt wird als aufgrund der bisherigen Erfahrung zu vermuten ist. Anhand einer Referenzprobe, welche mit einem neuen Fräser bearbeitet wurde, konnte belegt werden, dass dieser Effekt auf die Abnutzung (Standzeit) des Fräsers zurückzuführen ist (Abbildung 6-7). Durch die Versuchsdokumentationen konnte gezeigt werden, dass der bisher verwendete 6 mm Fräser für insgesamt lediglich 49 Probekörper verwendet werden konnte, wobei schon nach 30 bis 40 Einsätzen eine Beeinträchtigung der Transparenz beobachtet werden konnte.



Abbildung 6-7: Probenvergleich (Probe links Referenzprobe)

Eine Untersuchung des Fräsers mit einem Rasterelektronenmikroskop zeigt, dass sich während der Bearbeitung Kunststoff an der Schneide abgelagert hat (Adhäsion). Das führt bei weiterer Verwendung des Fräsers zu einem „Kunststoff-Kunststoff-Kontakt“, welches eine wesentlich schlechtere Oberflächenqualität hervorruft.

Die Abbildung 6-8 zeigt einen Vergleich der Schneide eines unbenutzten Fräsers (linkes Bild) und des benutzten Fräsers (rechtes Bild). Der abgelagerte Kunststoff ist dabei deutlich als porige Ablagerung auf der Schneide zu erkennen.

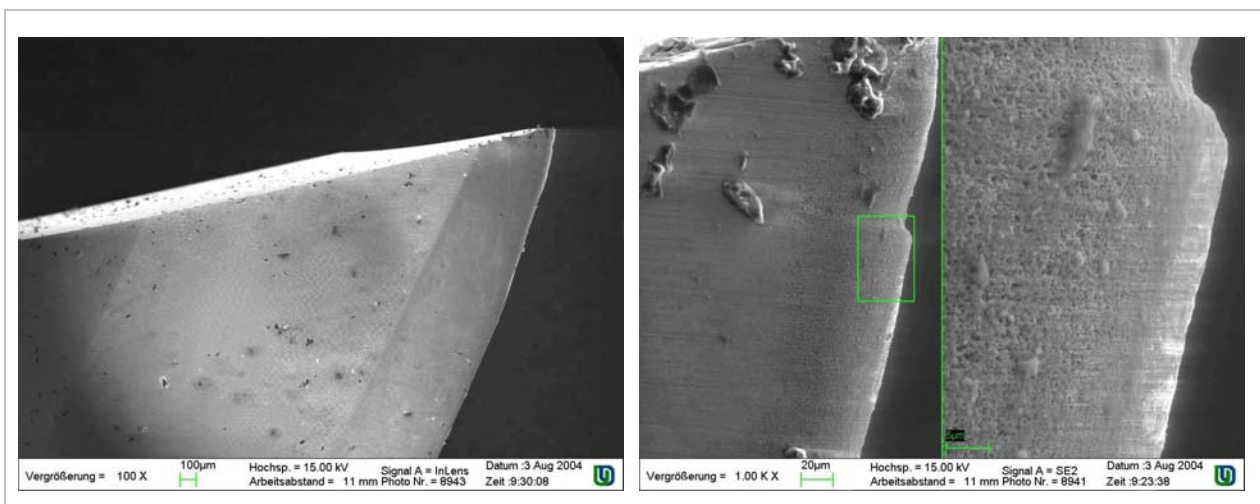


Abbildung 6-8: Rasterelektronenmikroskopaufnahme der Schneide

Die Ermittlung der Schnittgeschwindigkeit v_c lässt sich nach Gleichung 3.1 (Seite 31) mit den ermittelten obigen Werten bestimmen. Demnach ergeben sich bei der Verwendung z.B. von 5 bis 8 mm Fräsern, wie in der Untersuchung eingesetzt, Schnittgeschwindigkeiten von ca. 56 bis 226 m/min. Werden diese Werte nun mit den Richtwerten für Plexiglas in der Tabelle 3-1 (Seite 32) verglichen, so lässt sich erkennen, dass hier der untere Bereich z. T. verlassen wird. Wird der Vorschub pro Zahn f_z nach Gleichung 3.2 (Seite 31) bestimmt, so liegt dieser zwischen 0,022 und 0,031 mm/Zahn. Im Vergleich zu den Vorgaben ist dieser Wert ebenfalls grenzwertig.

Bei allen Versuchsreihen wurde festgestellt, dass es zwar erhebliche Unterschiede im Ergebnis gibt, das gewünschte Ziel einer transparenten Oberfläche aufgrund einer hinreichend hohen Drehzahl (und damit Schnittgeschwindigkeit) aber nicht erreicht werden kann. Daraus folgt, dass die Bauteile anschließend für eine vollständige Transparenz nachgearbeitet werden müssen.

Im weiteren Verlauf der Arbeit sollen die Untersuchungen anhand von zunehmend komplexeren Formelementen weitergeführt werden, welche Bestandteil eines Prüfwerkstückes der NC-Gesellschaft sind. Hier werden nicht nur 2,5D-Geometrien, sondern auch 3D-Geometrien untersucht werden. Zudem werden die Untersuchungen nun mit zweischneidigen Werkzeugen durchgeführt, um hier eine qualitative Aussage der Art des verwendeten Werkzeuges auf das Ergebnis zu erhalten. Als zusätzlicher Einflussparameter soll der Einfluss des verwendeten CAM-Moduls untersucht werden.

Zusammenfassend seien die Ergebnisse der durchgeführten Versuchsreihen noch einmal kurz dargestellt:

- **Durchmesser:** maximalen Durchmesser wählen
- **Schnitttiefe a_p / Schrittweite s_w :** sollte zwischen 1 mm und 6 mm betragen, jedoch abhängig vom Fräserdurchmesser
- **XY-Vorschub:** sollte zwischen 200 und 275 mm/min betragen
- **Drehzahl:** maximale Drehzahl verwenden
- **Fräsen:** Gleichlaufräsen ist zu bevorzugen
- **Strategie:** Bei komplexeren Geometrien die Fräsaufgabe in mehrere Frässtrategien aufteilen. Wenn möglich die Bearbeitungsstrategie *Zick* verwenden

6.2 NCG - Prüfwerkstück

Die NC-Gesellschaft e.V. versteht sich seit ihrer Gründung im Jahre 1975 als europäische Interessengemeinschaft zwischen Anwendern, Herstellern und Ausbildungsinstituten für alle Bereiche der Fertigungstechnologie. Die technischen Richtlinien, auch NCG - Empfehlungen genannt, sollen zur Einschätzung der Fertigungsgenauigkeit bzw. zur Maschinenbeurteilung dienen.

Als Grundlage für weitere Untersuchungen wurde das in den Prüfrichtlinien und Prüfwerkstücke für hochdynamische Bearbeitung (HSC) Teil 1: Fräsmaschinen und Bearbeitungszentren, beschriebene Werkstück ausgewählt [NCG 2004]. In diesem Werkstück sind wesentliche Geometrielemente definiert, die es ermöglichen, Maschinen hinsichtlich der Dynamik, der Bearbeitungsgeschwindigkeit und der Genauigkeit zu vergleichen. Die Prüfwerkstücke sollen ursprünglich zur Einschätzung der Fertigungsgenauigkeit (des HSC-Systems) bei Anfertigung der Werkstücke ohne Einfluss des jeweiligen Programmiersystems dienen und sind eigentlich bei „hochdynamischen Zerspanungsprozessen mit rotierenden Werkzeugen mit definierten Schneiden“ im Einsatz. Es werden für die Untersuchungen die wesentlichen Formelemente des Prüfwerkstücks selektiert. Die bisher erzielten Ergebnisse sollen dabei überprüft und weiter verifiziert werden.

Da der Anspruch an eine optimale Oberflächengüte gerichtet ist, sollen nur die dafür untersuchten Schnittparameter etc. des Schlichtvorgangs tabellarisch aufgeführt werden. Das vorherige Schruppen und Vorschlichten hat zwar einen wesentlichen Einfluss auf die Gesamtfertigungszeit, soll hier aber nicht ausführlich beschrieben werden.

Die Beurteilung der Oberflächengüte erfolgt, wie bereits in der vorherigen Untersuchung, primär durch eine subjektive Sichtprüfung, welche nur zu qualitativen Aussagen über das zu prüfende Objekt führt. Zusätzlich soll exemplarisch anhand von ausgewählten Probekörpern (Flächen) eine objektive Prüfung der Rauheit mit Hilfe eines Rauheitsmessgerätes durchgeführt werden (Kapitel 6.3), um einen möglichen Zusammenhang zwischen Oberflächengüte (Transparenz) und Rauheitsprofil herstellen zu können.

Es wurden folgende Formelemente untersucht:

- Zylinder mit unterschiedlichen Durchmessern
- Kegelstumpf
- Formflächen
- Kugelsegment
- Planflächen

Die theoretischen Bearbeitungszeiten wurden ermittelt und mit der tatsächlichen Bearbeitungszeit verglichen. Für die Untersuchungen wurde sowohl das Modul CAMWorks 2004 Plus als auch das Modul Millit benutzt, um hier die wesentlichen Unterschiede herauszuarbeiten und aufzuzeigen.

6.2.1 Untersuchung von 2,5D und 3D-Formelementen mit CAMWorks

Um das Zerspanvolumen zu reduzieren und um die Formelemente effektiver zu untersuchen, wurde das Prüfwerkstück in seine einzelnen Formelemente separiert. Ausgehend von den vorherigen Untersuchungen wurden in einem ersten Arbeitsschritt der Zylinder selektiert und anschließend dreimal nebeneinander platziert (Abbildung 6-9). Dadurch besteht die Möglichkeit, die unterschiedlichen gefahrenen Parameter wie Strategie und Schnittwerte etc. sofort augenscheinlich zu vergleichen und zu bewerten.

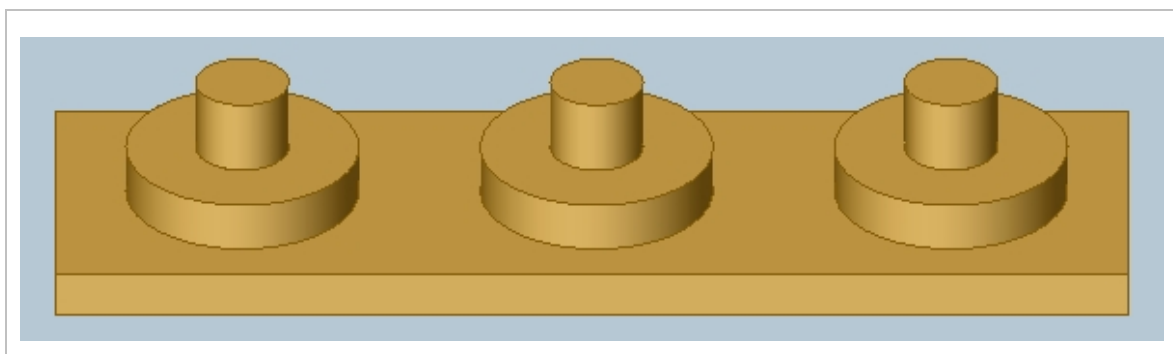


Abbildung 6-9: Zylinder des Prüfwerkstücks

Der untere Zylinder besitzt einen Durchmesser von 25 mm und eine Höhe von 5,4 mm, der obere Zylinder hat einen Durchmesser von 10 mm und eine Höhe von 8 mm. Der Schrappvorgang (Bearbeitungsstrategie *Zick Zack*) für den großen Zylinder wurde mit einem 8 mm Schaftfräser durchgeführt. Bei einer max. Schrittweite von 3 mm wurde ein unteres sowie seitliches Aufmaß von 0,4 mm gelassen. Für das Vorschlichten des kleineren Zylinders wurde die Strategie *Z-Ebene* gewählt, bei einer Schrittweite von 3 mm und einem seitlichen sowie unteren Aufmaß von 0,4 mm. Da es sich hier um ein 2,5D-Feature handelt, kann das Werkzeug in einem Arbeitsschritt bei maximaler Zustelltiefe (8 mm, obere Zylinder) die Geometrien fertig schlichten. In diesem Fall ist es sinnvoll, den zum Schrappen verwendeten Schaftfräser zu benutzen (Es sollte prinzipiell der größtmögliche Fräserdurchmesser eingesetzt werden). Zudem ist es ratsam, die An- und Abfahrtswege des Fräasers so zu steuern, dass diese nicht senkrecht von oben in die Geometrie eintauchen, um Abdrücke des Fräasers auf der Oberfläche des Zylinders zu vermeiden. Der Fräser sollte also möglichst waagerecht An- und Abfahren. Dabei sind die Schnittparameter so zu wählen, dass Ausbrüche an den Kanten des Zylinders vermieden werden. Die Zeit dieser Bearbeitungsschritte liegt dabei, je nach gewählten Parametern, zwischen 10 bis 20 Minuten.

Aufgrund der Erfahrungen aus den vorangegangenen Untersuchungen wurde die Versuchsreihe auf 5 Versuche (15 untersuchte Zylinder) beschränkt. Folgende Parameter wurden gewählt:

	Zylinder links	Zylinder mitte	Zylinder rechts
Fräser Ø (mm) u. Typ	8, Schaft	8, Schaft	8, Schaft
n (1/min)	9000	9000	9000
v_f (mm/min)	100, 250	200, 250	300, 250
v_z (mm/min)	40, 100	80, 100	120, 100
Strategie	Z-Ebene	Z-Ebene	Z-Ebene
s_w (mm)	maximal	maximal	maximal

Tabelle 6-5: Fräsparmeter Schlichten (Wertebereiche)

Die Zylinder wurden bei maximaler Zustelltiefe fertig geschlichtet. In der ersten Versuchsreihe ergaben sich als Ergebnis erhebliche Ausbrüche an den Geometrien, davon jeweils die Stirnseiten der unteren Zylinder (Abbildung 6-10, Bild A). Dieses kann auf die zu hohen gewählten Vorschubgeschwindigkeiten und zu geringen Drehzahlen bei den vorherigen Bearbeitungsschritten zurückgeführt werden. Hier wird nochmals die Empfindlichkeit des Werkstoffes deutlich. Des

Weiteren ergaben sich durch unterschiedliche An- und Abfahrtsstrategien unterschiedliche Ergebnisse auf der Oberfläche des unteren Zylinders. Abbildung 6-10 (Bild B) zeigt das Ergebnis einer Strategie. Dabei fährt das Werkzeug tangential an sowie ab. Der Fräser umfährt hierbei einmalig den oberen Zylinder (siehe Abbildung 6-10, Bild C). Zurück bleibt eine Fräuserspur, die sich auf den Oberflächen der Probekörper abzeichnet.

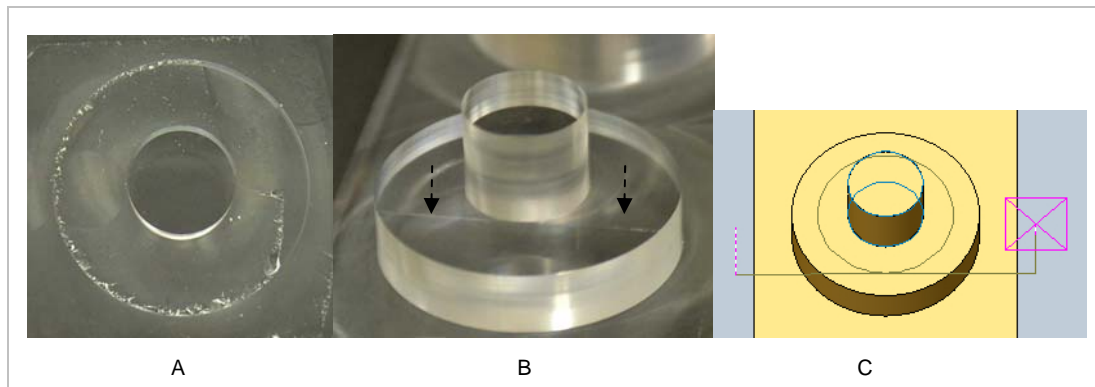


Abbildung 6-10: Ergebnisse der Versuchsreihe Zylinder

Weitere Untersuchungen ergaben, dass es in diesem Fall sinnvoll ist, radial anzufahren und tangential nach oben abzufahren, um die Abdrücke des Werkzeuges zu minimieren (Abbildung 6-11). Als Gesamtergebnis können die Geometrien ohne Ausbrüche gefertigt werden. Die dabei erzielte Transparenz wird subjektiv als befriedigend bewertet. Der Vorschub liegt in einem Bereich von 200 bis 300 mm/min, empfohlen wird auch hier ein Vorschub von 250 mm/min. Damit ergibt sich eine mittlere Schnittgeschwindigkeit v_c von 226 m/min. Der sich daraus ergebende Vorschub pro Zahn liegt bei 0,014 mm/Zahn. Damit befinden sich diese Werte im unteren Bereich der vorgeschlagenen Wertebereiche. Die tatsächliche Fertigungszeit liegt in einem Bereich von 11 bis 22 Minuten. Im Durchschnitt liegt sie damit um 3,5 % höher als die vorher durch Simulation des CAM-Modul berechnete Fertigungszeit. Obwohl das verwendete CAM-Modul den zugehörigen Post-Prozessor des Bearbeitungszentrums (der Steuerung) implementiert hat, ergeben sich diese Abweichungen. Eine genaue Erklärung für diesen Sachverhalt konnte nicht gefunden werden.



Abbildung 6-11: Zylinder, fertig geschlichtet

In einem zweiten Schritt wurde der Kegel ausgewählt und damit erstmals ein 3D-Feature. Diese wurden analog zu den Zylindern ebenfalls dreimal nebeneinander platziert (Abbildung 6-12). Die Grundfläche des Kegels besitzt einen Durchmesser von 29 mm, die obere Fläche einen Durchmesser von 4,83 mm. Die Höhe des Kegels beträgt 14,4 mm. Damit ergibt ein Winkel von 50 Grad der Mantelfläche zur Grundfläche. Der Kegel wurde mit einem 8 mm Schaftfräser geschruppt, ausgewählt wurde aufgrund der Geometrie die Bearbeitungsstrategie *Tasche nach außen*. Als Aufmaß wurde 0,4 mm mit einer Schrittweite von 2 mm gewählt. Anschließend wurden in einem ersten Schlichtvorgang die Kegel mit einem 6 mm Torusfräser (Eckenradius von 1 mm) bearbeitet. Die Schrittweite in Z-Richtung beträgt dabei 0,5 mm und das Aufmaß 0,05 mm. Als Strategie wurde *Z-Ebene* gewählt. Die Zeit für das Schruppen und Vorschlichten beträgt dabei zwischen 24 und 31 Minuten, abhängig vom gewählten Vorschub sowie der Zustelltiefe. In einem letzten Bearbeitungsschritt wurde das Bauteil fertig geschlichtet. Für das Schlichten dieser Geometrie sind zwei Bearbeitungsstrategien sinnvoll: Zum einen eine Bearbeitung in Z-Richtung mit konstanter Schrittweite (Strategie *Z-Ebene*), zum anderen die Bearbeitungsstrategie *Spirale* mit definierter Steigung.

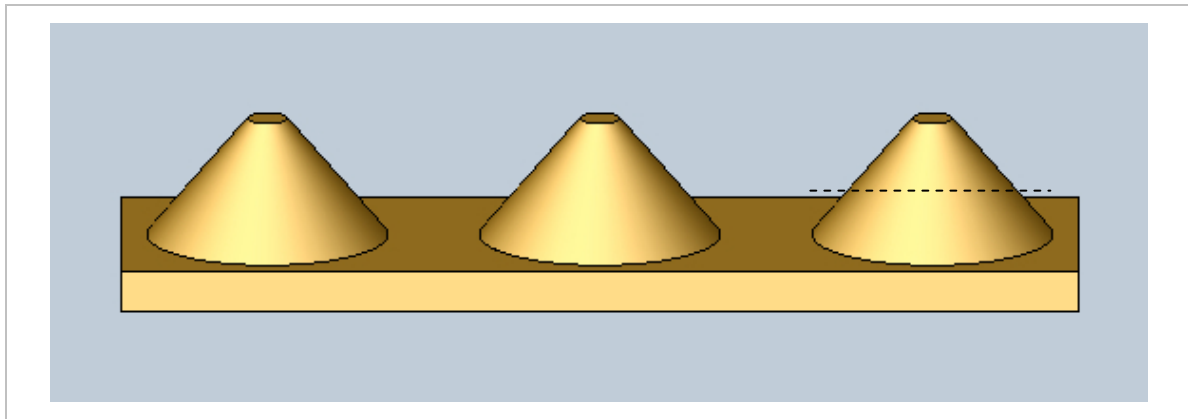


Abbildung 6-12: Kegel des Prüfwerkstücks

Bei dem rechten Kegel wurden zwei Bearbeitungsstrategien mit unterschiedlichen Schnittparametern gefahren (oben, unten), um dort den Unterschied bzw. Übergang an dem Kegel sichtbar zu machen. Zum anderen verdeutlicht dies den Vorteil bei der Verwendung dieser Art von CAM-Moduln, da Formelementen eine definierte Tiefe zugeordnet werden kann, an der eine Bearbeitung stattfinden soll. Es lassen sich dadurch bestimmte Bereiche einer Geometrie individuell bearbeiten. Diese Möglichkeit ist mit anderen CAM-Moduln z.T. nicht möglich. Einen Überblick über die gewählten Parameter gibt Tabelle 6-6.

	Kegelstumpf links	Kegelstumpf mitte	Kegelstumpf rechts, oben	Kegelstumpf rechts, unten
Fräser Ø (mm) u. Typ	3 u. 6, Kugel	2, Radian (r=0,2) 3, Kugel	3 u. 6, Kugel	2, Radian (r=0,2) 3 u. 6, Kugel
n (1/min)	9000	9000	9000	9000
v_f (mm/min)	400 - 3000	400 - 3000	400 - 3000	400 - 3000
v_z (mm/min)	120 - 1500	120 - 1500	500	500
Strategie	Spirale	Spirale	(Spirale) Z-Ebene	Z-Ebene
s_w (mm)	0,05 / 0,1 / 0,5	0,05 / 0,1 / 0,5	0,05 / 0,1	0,05 / 0,1

Tabelle 6-6: Fräsparemeter Schichten (Wertebereiche)

Abbildung 6-13 zeigt das Ergebnis ausgewählter Kegel aus den insgesamt 14 Versuchsreihen (42 untersuchte Kegel). Sehr deutlich sind Unterschiede zu erkennen, besonders an dem Kegelstumpf in Bild A. Der obere Teil ist mit einem 6 mm Kugelfräser bearbeitet worden, der untere Teil mit einem 2 mm Torusfräser mit dem Radius 0,2 mm. Bei beiden sind dieselben Schnittparameter verwendet ($v_f = 400$ mm/min) worden. Als Bearbeitungsstrategie wurde *Z-Ebene* ge-

wählt, die Schrittweite beträgt 0,1 mm. Die Qualität der oberen Bearbeitung ist deutlich transparenter als unten. Der Kugelfräser erzeugt eine wesentliche bessere Oberflächenqualität mit den gegebenen Fräsparametern als der Torusfräser. Ein weiterer Unterschied ergibt sich, wenn die obere Hälfte des Kegels von Bild A und der Kegel von Bild B betrachtet werden. Bei dem Kegel von Bild B sind dieselben Schnittparameter und derselbe Fräser (6 mm Kugelfräser) verwendet worden, allerdings jetzt die Bearbeitungsstrategie *Spirale* mit einer Steigung von 0,1 mm. Bei diesem Kegel sind vertikal verlaufenden Facetten zu beobachten.

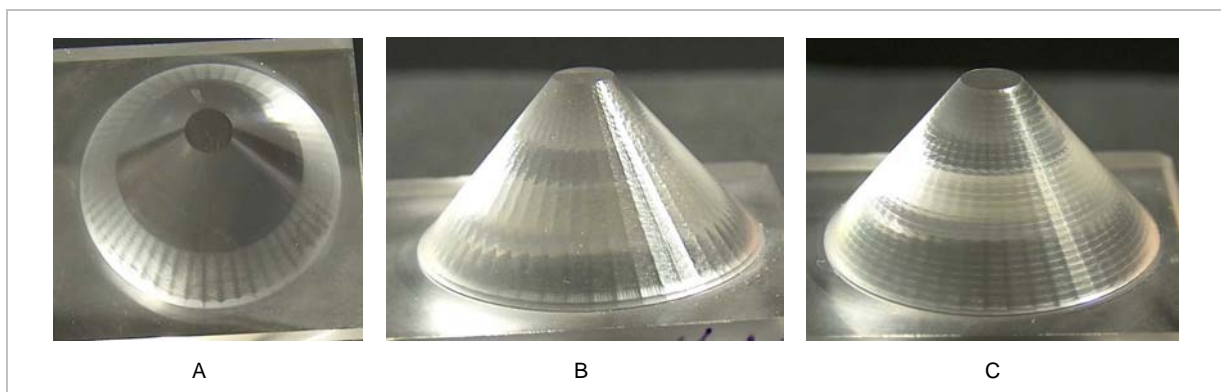


Abbildung 6-13: Ergebnisse der Versuchsreihen

Wird nun unter gleichen Schnittparametern ein 3 mm Kugelfräser verwendet, so lassen sich auf der Oberfläche des Kegels neben den vertikalen Facetten auch horizontale Facetten erkennen (siehe Bild C). Es bleiben deutliche Bearbeitungsspuren auf der Oberfläche zurück. Eine Ursache dafür konnte nicht hergeleitet werden. Es ist möglicherweise abhängig davon, ob die Steuerung des Bearbeitungszentrums die Daten (Kreisinterpolation) richtig ausführen bzw. den erzeugten Maschinen-Code richtig umsetzen kann. Die gesamte Fertigungszeit liegt zwischen 40 und 80 Minuten. Dabei liegt sie im Durchschnitt um 2,82 % über der simulierten Bearbeitungszeit.

Für die Bearbeitung dieser Art von Formelementen sind Vorschubwerte in einem Bereich von 400 (bestes Ergebnis) bis 3000 mm/min untersucht worden. Ausschlaggebend für das Ergebnis ist hierbei aber nicht der Vorschub, sondern eher die Wahl eines geeigneten Fräasers. Große Vorschübe (z.B. 3000 m/min) auf engen Kreisbahnen sind vom Bearbeitungszentrum kaum umzusetzen. Im Durchschnitt liegen die dann tatsächlich erzielten Vorschübe bei ca. 1900 mm/min. Aus den Untersuchungen geht deutlich hervor, dass der Einsatz eines Torusfräasers nicht zu empfehlen ist, da die Oberfläche sehr milchig wird. Hier ist aufgrund des Radius ein Kugelfräser zu

bevorzugen. Die entstehenden Schnittgeschwindigkeiten liegen bei 84,78 bis 169,56 m/min. Der Vorschub pro Zahn beträgt 0,017 mm/Zahn.

Als dritte und letzte Geometrie wurde die Formfläche (Rampe) mit dem integrierten Kugelsegment selektiert (Abbildung 6-14). Der Schrappvorgang (Bearbeitungsstrategie *Zick Zack*) wurde mit einem 8 mm Schaftfräser durchgeführt. Bei einer max. Schrittweite von 3 mm wurde ein unteres sowie seitliches Aufmaß von 0,4 mm berücksichtigt. Anschließend wurde mit einem 6 mm Kugelfräser mit der Bearbeitungsstrategie *Z-Ebene* bei einer Schrittweite von 0,5 mm und einem Aufmaß von 0,2 mm vorgeschlichtet. Die Bearbeitungszeit liegt dabei zwischen 16 bis 70 Minuten, abhängig von den gewählten Parametern.

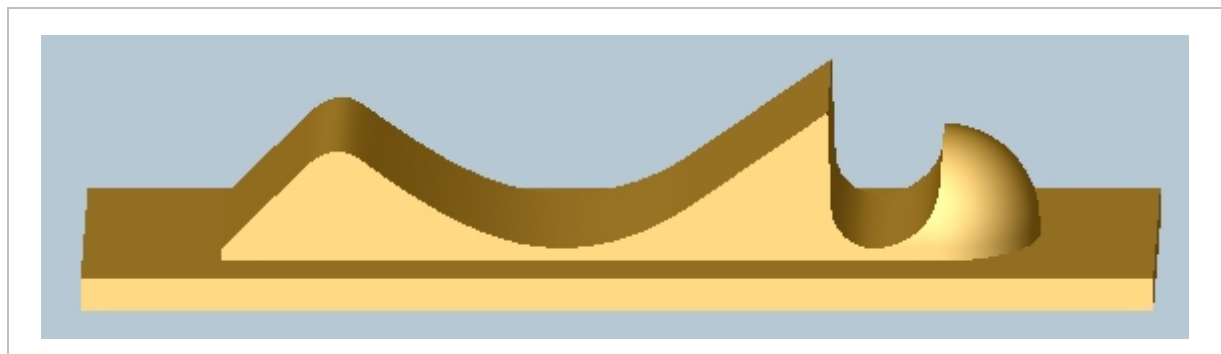


Abbildung 6-14: Rampe mit Kugelsegment des Prüfwerkstücks

Bei diesen Formelementen wurde zum ersten Mal die Bearbeitungsstrategie *Schnitt* untersucht. Diese entspricht im Prinzip der Strategie *Zick* oder *Zick Zack* bei 2,5D-Elementen. Bei 3D-Elementen, wie zum Beispiel der Rampe, fährt das Werkzeug von links nach rechts, fährt im Eilgang wieder zurück, und fährt anschließend die nächste Bahn, versetzt um eine definierte Schrittweite (Strategie *Zick*).

	Rampe	Kugelsegment
Fräser Ø (mm) u. Typ	3, 6, Kugel	3, 6, Kugel
n (1/min)	9000	9000
v_f (mm/min)	250 - 1000	250 - 1000
v_z (mm/min)	150	150
Strategie	Z-Ebene, Schnitt	Z-Ebene, Schnitt
s_w (mm)	0,1	0,1

Tabelle 6-7: Fräsparmeter Schlichten (Wertebereiche)

Bei der Option *Zick Zack* nimmt das Werkzeug auch auf dem Weg zurück Span ab, immer jeweils versetzt um die Schrittweite. Auf diese Weise verkürzt sich die Bearbeitungszeit wesentlich. Die Fräsparmeter für das Schlichten sind in Tabelle 6-7 dargestellt.

In dieser Versuchsreihe wurden insgesamt 10 Proben gefahren. Zuerst wurde die Geometrie in unterschiedliche Areale und damit unterschiedliche Operationen eingeteilt. Die Formfläche wurde mit der Bearbeitungsstrategie *Schnitt* bearbeitet (6 mm Kugelfräser), das Kugelsegment mit der Bearbeitungsstrategie *Z-Ebene* (3 mm Kugelfräser) geschlichtet ($v_f = 250$ mm/min). Durch die Strategie (Schrittweite 0,1 mm) entstanden an dem Kugelsegment vertikal verlaufende Facetten. Zudem bleibt im obersten Punkt des Kugelsegments ein Abdruck zurück, da der Fräser an dieser Stelle den Ursprung seiner Werkzeugbahnen besitzt. Das linke Bild in Abbildung 6-15 zeigt dies anschaulich. Auch hier kann die Steuerung die Daten nicht richtig umsetzen. Aus diesem Grund wurde die Bearbeitungsstrategie *Schnitt* gewählt. Bei dieser Bearbeitungsstrategie kann die Laufrichtung von z.B. Parallel der X-Richtung sogar über eine Winkleingabe gesteuert und verändert werden. Das rechte Bild in Abbildung 6-15 zeigt die wesentlich bessere Oberfläche des Kugelsegments.

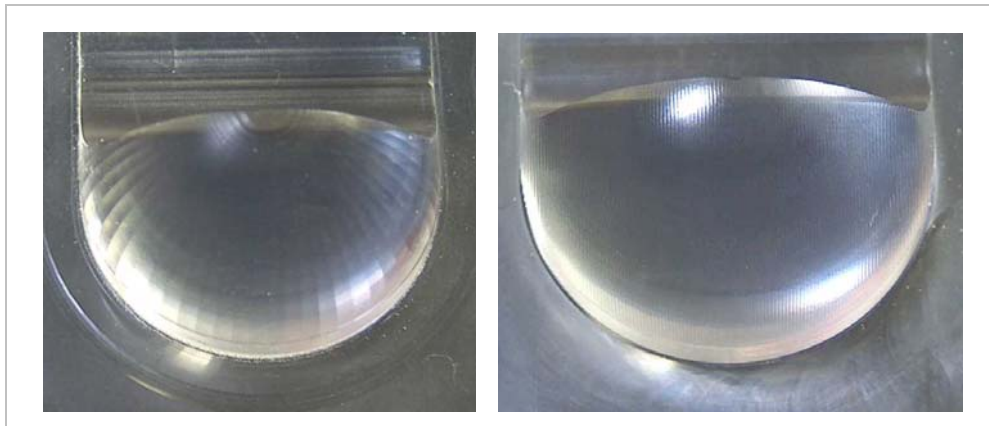


Abbildung 6-15: Ergebnis Versuchsreihe Kugelsegment

Bei der Verwendung der Strategie *Z-Ebene* für die Rampe wurde in der Senke der Rampe das Material nicht vollständig entfernt. Das liegt daran, dass sich der generierte Werkzeugweg links und rechts der Senke nicht an dieser Stelle überschneidet. Des Weiteren ist die Oberflächenqualität schlechter als durch die Bearbeitungsstrategie *Schnitt*. Aus diesem Grund ist die Strategie *Z-Ebene* nicht zu empfehlen. Die Gesamtzeit für das Bearbeiten dieser Geometrie dauert zwischen 39 und 169 Minuten und damit Durchschnittlich um 12 % länger als die Simulation vorgibt. Wie auch in allen anderen Versuchsreihen erreicht die Oberflächenqualität nicht die gewünschte Güte. Auch hier wäre ein manuelles Bearbeiten notwendig. Das Schlichten dieser Geometrie mit der Bearbeitungsstrategie *Schnitt* ist daher zu bevorzugen. Der dabei verwendete Vorschub v_f kann zwischen 200 und 1000 mm/min liegen, empfohlen wird ein Vorschub von 250 mm/min. Die sich daraus ergebenden Schnittgeschwindigkeiten v_c liegen bei 84,78 bis 169,56 m/min. Der Vorschub pro Zahn beträgt 0,017 mm/Zahn. Abbildung 6-16 zeigt das Ergebnis einer Probe (Fertigungszeit 95 Minuten), welche mit der Bearbeitungsstrategie *Schnitt* komplett geschlichtet worden ist (Vgl. dazu Abbildung 6-20).



Abbildung 6-16: Ergebnis Probekörper Formflächen mit Kugelsegment

6.2.2 Untersuchung von 2,5D und 3D-Formelementen mit Millit

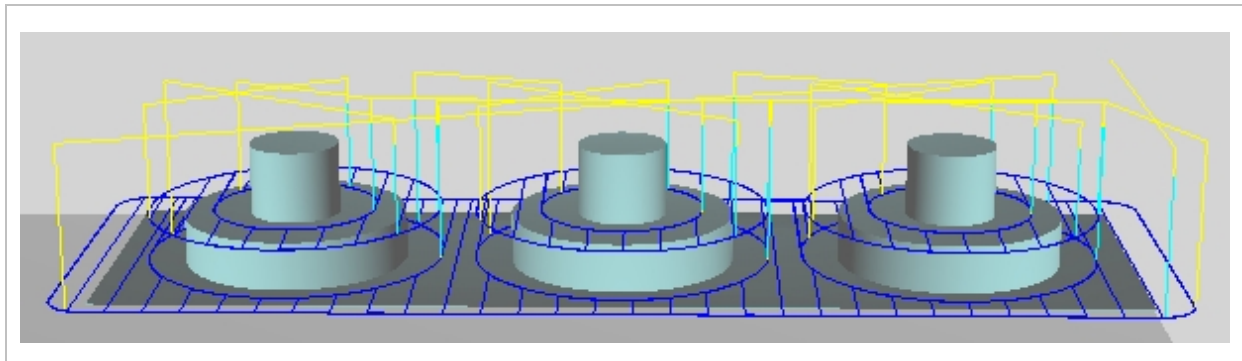
Um die entsprechenden Formelemente mit dem Modul Millit zu bearbeiten, wurden die Geometrien aufgrund der auf Seite 10 beschriebenen Problematik in höchster Qualität in ein STL-Format überführt. Dieses wurde als Projekt geladen und bearbeitet (siehe Kapitel 5-4). In einem ersten Schritt wurden die Zylinder ausgewählt. Um die Ergebnisse vergleichen zu können, sollten die in den vorherigen Untersuchungen benutzten Schnittparameter übernommen werden. Die Zylinder wurden mit einem 8 mm Schaftfräser geschruppt. Als Aufmaß wurden 0,4 mm mit einer Schrittweite von 3 mm gewählt. Beim Schruppen konnte nur die einzig zur Verfügung stehende Bearbeitungsstrategie *Mäander (Zick Zack)* ausgewählt werden. Für das Schlichten (Tabelle 6-8) wurden folgende Parameter gewählt:

	Zylinder links	Zylinder mitte	Zylinder rechts
Fräser Ø (mm) u. Typ	8, Schaft	8, Schaft	8, Schaft
n (1/min)	9000	9000	9000
v _f (mm/min)	250, 500	250, 500	250, 500
v _z (mm/min)	150	150	150
Strategie	Ebenen	Ebenen	Ebenen
s _w (mm)	maximal	maximal	maximal

Tabelle 6-8: Fräsparmeter Schlichten (Wertebereiche)

Die hier für das Schlichten verwendete Bearbeitungsstrategie *Ebenen* entspricht der Bearbeitungsstrategie *Z-Ebene* in dem CAMWorks Modul. Bei der vorliegenden Geometrie wurde als Schrittweite in Z-Richtung die maximale Zustelltiefe gewählt (Zylinder unten = 5,4 mm, Zylinder oben = 8 mm). Während in dem CAMWorks Modul die Möglichkeit besteht, den einzelnen Formelementen (Arealen) unterschiedliche Bearbeitungsstrategien zuordnen zu können, ist dieses bei Millit nicht möglich. Daher reduziert sich die Anzahl der Bearbeitungs- sowie Frässtrategien beim Schlichten auf eins und das Ergebnis ist bei allen drei Zylindern entsprechend identisch (siehe dazu Abbildung 6-17). Diese Einschränkung ist ein wesentlicher Nachteil dieses Moduls. Aus diesem Grund wurde auf ein ausgedehntes Versuchsprogramm verzichtet.

Die Bearbeitungszeit zum Schruppen liegt bei maximal 5 Minuten.

**Abbildung 6-17: Bearbeitungsstrategie beim Schlichten**

Ein Ergebnis dieser Untersuchung zeigt Abbildung 6-18. Auch hier können die Zylinder ohne Ausbrüche gefertigt werden. Die Zeit zum Schlichten beträgt dabei bis zu 14 Minuten, so dass die Gesamtzeit bei max. 19 Minuten liegt. Dabei liegt sie um 3,6 % unter der theoretischen Fertigungszeit. Auffällig bei den Zylindern sind die Mantelflächen, welche im Gegensatz zu den unter Kapitel 6.2.1 gefertigten Zylindern stark facettiert sind. In dem linken Bild in Abbildung 6-18 sind zur Veranschaulichung die Sehnen kenntlich markiert. Dieser Effekt lässt sich darauf zurückführen, dass die Steuerung des Bearbeitungszentrums den erzeugten Maschinenweg bzw. die Kreisinterpolation nicht richtig umsetzen kann (Anzahl der Datenpunkte zu groß). Eine Erhöhung der Sehnentoleranz von 0,01 auf ein Tausendstel führte zu keinen nennenswerten Verbesserungen. Dieser Sachverhalt ist deutlich als Nachteil zu werten, zumal die vorliegende Geometrie in höchster Qualität abgespeichert worden ist.

**Abbildung 6-18: Ergebnis der Versuchsreihe**

In Weiteren wurden die Kegel bearbeitet. Die Kegel konnten mit einem 8 mm Schaftfräser geschruppt werden. Als Aufmaß wurden 0,4 mm mit einer Schrittweite von 2 mm gewählt. Danach wurde der Boden mit der Strategie *Ebenen* ohne Aufmaß geschlichtet. Anschließend konnten in einem ersten Schlichtvorgang die Kegel mit einem 6 mm Torusfräser mit einem Eckenradius von 1 mm bearbeitet werden. Als Schrittweite in Z-Richtung wurden dabei 0,5 mm und als Aufmaß 0,1 mm (1 x 0,05 mm) gewählt. Danach konnte das Bauteil fertig geschlichtet werden. Die Zeit für die Bearbeitungsschritte beträgt max. 2 Stunden, wovon ca. die Hälfte auf das Schlichten entfällt. Die Zeit liegt insgesamt um 4,6 % über der theoretischen Fertigungszeit. Für das Schlichten dieser Geometrie steht dabei nur eine sinnvolle Bearbeitungsstrategie zur Verfügung, welche auch nicht separat auf einzelne Formelemente angewendet werden kann. Dies ist die Bearbeitungsstrategie *Konturen*, welche einer Bearbeitung in Z-Richtung mit konstanter Schrittweite entspricht. Folgende Parameter sind gewählt worden (siehe Tabelle 6-9):

	Kegelstumpf links	Kegelstumpf mitte	Kegelstumpf rechts
Fräser Ø (mm) u. Typ	6, Kugel	6, Kugel	6, Kugel
n (1/min)	9000	9000	9000
v_f (mm/min)	400, 3000	400, 3000	400, 3000
v_z (mm/min)	120, 900	120, 900	120, 900
Strategie	Konturen	Konturen	Konturen
s_w (mm)	0,1	0,1	0,1

Tabelle 6-9: Fräsparmeter Schlichten

Um einen Vergleich zu den Kegelstümpfen aus Kapitel 6.2.1 zu erhalten, wurden hier lediglich drei äquivalente Versuchsreihen mit einem Werkzeug gefahren.

Abbildung 6-19 zeigt das Ergebnis einer Versuchsreihe ($v_f = 400$ mm/min). Wie zu erkennen ist, unterscheidet sich die Oberfläche im Vergleich mit den Kegelstümpfen aus Kapitel 6.2.1 (Seite 71) im Bezug auf die Oberflächenqualität. Vertikal verlaufende Facetten sind hier nicht zu erkennen. Stattdessen sind vertikal verlaufende „Abdrücke“ zu erkennen. Dieses lässt auf unterschiedliche Verfahrenswege schließen, die von den beiden CAM-Moduln generiert worden sind. Im Bezug auf den Vorschub lässt sich festhalten, dass ein gefahrener Vorschub von 400 mm/min im Gegensatz zu einem Vorschub von ca. 3000 mm/min eine bessere Oberflächenqualität erzielt, die Fertigungszeit sich jedoch um über eine Stunde erhöht.



Abbildung 6-19: Ergebnis der Versuchsreihe

Insgesamt lässt sich festhalten, dass das Ergebnis für diese Versuchsreihe nicht zufrieden stellend ist. Die durch Kreisbahnen entstehenden Geometrien weisen eine schlechte Oberflächengüte auf und müssten durch einen hohen manuellen Aufwand nachgearbeitet werden.

Als drittes und letztes wurden die Formflächen mit dem integrierten Kugelsegment gefertigt (2 Proben). In diesem Fall ist eine Zuordnung von Bearbeitungsstrategien zu einzelnen Flächen wünschenswert, lässt sich jedoch nicht realisieren. Das Schruppen mit einem 6 mm Schaftfräser (Z-Schrittweite 1 mm, Aufmaß 0,4 mm, Bearbeitungsstrategie *Mäander*) dauerte zwischen 30 und 60 Minuten.

	Formflächen/Kugelsegment
Fräser Ø (mm) u. Typ	6, Kugel
n (1/min)	9000
v_f (mm/min)	250
v_z (mm/min)	150
Strategie	Konturen, Parallel X
s_w (mm)	0,1

Tabelle 6-10: Fräsparameter Schlichten

Als sinnvoll für diesen Bearbeitungsschritt hat sich die Bearbeitungsstrategie *Parallel X* herausgestellt. Diese entspricht der Bearbeitungsstrategie *Schnitt* in dem CAMWorks-Modul. Allerdings lässt sich hier nicht vermeiden, dass der Fräser nicht nur die Geometrie, sondern auch die Bodenfläche vollständig mitbearbeitet. Dadurch erhöht sich die Bearbeitungszeit für das Schlichten auf 208 Minuten. Der vergleichbare Vorgang mit der Selektion der entsprechenden Flächen in dem anderen CAM-Modul dauert dagegen nur rund 95 Minuten (siehe Seite 75). Die hier erzielte Qualität weist gegenüber der Geometrie auf Seite 75 keine großen Unterschiede auf und ist als Gleichwertig zu betrachten. Als Alternative wurden die Formelemente auch mit der Bearbeitungsstrategie *Ebenen* geschlichtet, die Fertigungszeit konnte um ca. eine Stunde reduziert werden, es ergab sich aber ein wesentlich schlechteres Ergebnis. Insgesamt konnte die komplexe Geometrie ohne Ausbrüche gefertigt werden (Abbildung 6-20). Die Fertigungszeit mit 4 Stunden und 4 Minuten liegt um 6 % niedriger als die theoretische Fertigungszeit.



Abbildung 6-20: Ergebnis der Versuchsreihe

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen in Bezug auf die eingesetzten CAM-Moduln, dass eine CAD-interne NC-Programmierung einer CAD-externen NC-Programmierung vorzuziehen ist. Hier wurden die besten Ergebnisse erzielt. Um nun die physikalische Ursache für die unterschiedliche Transparenz zu finden, wird die Rauheit einzelner Flächen der unterschiedlichen mit CAMWorks gefertigten Probekörper exemplarisch untersucht. Auf diese Weise lässt sich eine mögliche und vorhandene Beziehung zwischen Transparenz und Oberflächengüte herstellen.

6.3 Ermittlung der Rauheit

Die Prüfung der Qualität der zu verarbeitenden und produzierten Erzeugnisse hinsichtlich der jeweilig geforderten Eigenschaften ist wesentlicher Bestandteil der Mess- und Prüftechnik. Die Art des Bearbeitungsprozesses hat einen erheblichen Einfluss auf die Oberflächenbeschaffenheit eines Werkstückes. Die Abweichungen einer Oberfläche von ihrer idealen Gestalt haben einen großen Einfluss auf das erwartete Funktionsverhalten von Elementen (z.B. Maschinenteilen). So werden z.B. das Verschleißverhalten, die Schmierfähigkeit sowie die Passungseigenschaften ebenso beeinflusst wie auch der optische Eindruck [Lemke 1992]. Die Güte technischer Oberflächen wird nach DIN EN ISO 8785:1999 durch die Begriffe Welligkeit und Rauheit gekennzeichnet. Unter Rauheit wird eine regelmäßig oder unregelmäßig wiederkehrende „kurzwellige“ Gestaltabweichung verstanden. Welligkeit ergibt sich aus überwiegend periodisch auftretenden „langwelligen“ Gestaltabweichungen. Bei der Beurteilung von Oberflächen wird unterschieden zwischen zerspanenden und spanlosen Bearbeitungsprozessen. Rauheit entsteht bei zerspanenden Bearbeitungsprozessen durch z.B.:

- unmittelbare Einwirkung der Werkzeugschneide,
- Geometrie und Kinematik eines Werkzeuges,
- die Art der Spanbildung,
- den Vorschub.

Wesentliche Kenngrößen bei der Beurteilung sind nach DIN EN ISO 4288:1999 die gemittelte Rautiefe (R_z), die maximale Rautiefe (R_{max}) sowie der arithmetische Mittenrauwert (R_a). Zur Messung wurde ein Rauheitsmessgerät (Hommeltester T1000) eingesetzt. Durch den Einsatz eines Profilfilters wurde der sog. Hochpassausgang genutzt, bei dem langwellige Profilkomponenten (Tiefpassausgang) unterdrückt werden. Die Kenngrößen wurden für ausgewählte Flächen der Probekörper bestimmt und sind nachfolgend in den Abbildungen graphisch dargestellt.

In Abbildung 6-21 ist das Rauheitsprofil der Zylindermantelfläche der Probe Z5 dargestellt. Wie zu erkennen ist, liegt der R_a -Wert bei $0,43 \mu\text{m}$ (Referenz einer unbehandelten Probe $R_a = 0,03 \mu\text{m}$). Es handelt sich dabei also um eine sehr glatte Oberfläche, die eine relativ gute Transparenz aufweist. Auffällig ist der vorhandene Peak. Demnach muss an einer Stelle der Mantelfläche das Material nicht vollständig abgetragen worden sein. Da der Fräser bei voller Zustelltiefe nur ein-

mal um den Zylinder gefahren ist, bedeutet das, dass der Fräser an dieser Stelle einen minimalen Ausbruch besitzt. Damit ist der Fräser schadhaft und im Prinzip für das Schlichten nicht mehr einzusetzen. Eine visuelle Überprüfung bestätigt diese Aussage. Wie in der Abbildung 6-22 zu erkennen ist, weist die Probe eine „Linie“ um die Mantelfläche auf.

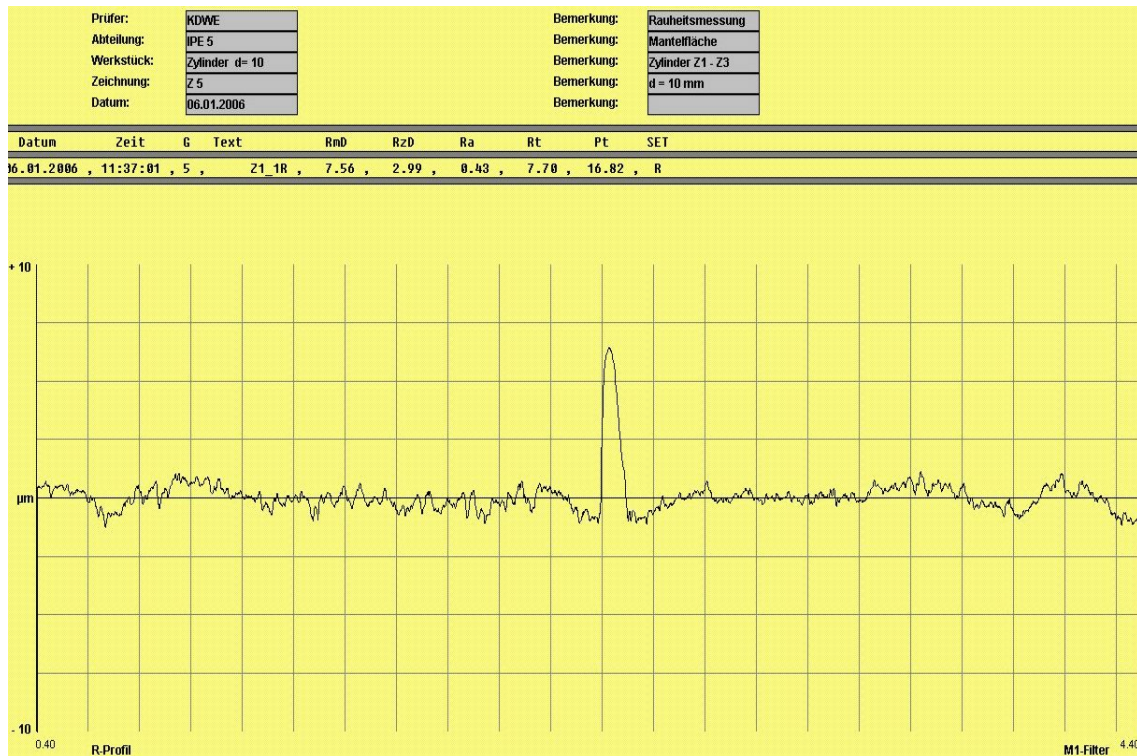


Abbildung 6-21: Rauheitsprofil Zylindermantelfläche Probe Z5

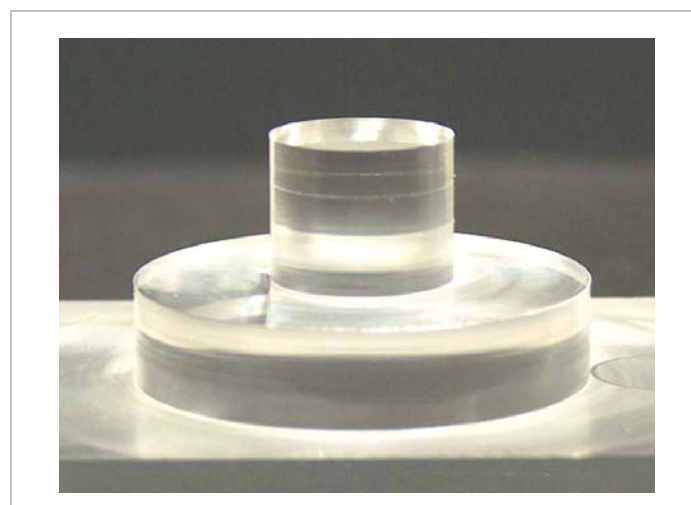


Abbildung 6-22: Zylinder Z5 der Versuchsreihe

Ein weiteres Beispiel zeigt die Untersuchung des Kegels aus Abbildung 6-13 (Bild A, Seite 72). Hier ist der qualitative Unterschied bei der Verwendung unterschiedlicher Fräser zu erkennen, bei sonst konstanten Schnittparametern. Die nachfolgende Abbildung 6-23 zeigt das Rauheitsprofil der Oberfläche (obere Teil des Kegels), welche mit einem 6 mm Kugelfräser bearbeitet worden ist. Der R_a -Wert liegt in diesem Fall bei $0,31 \mu\text{m}$.

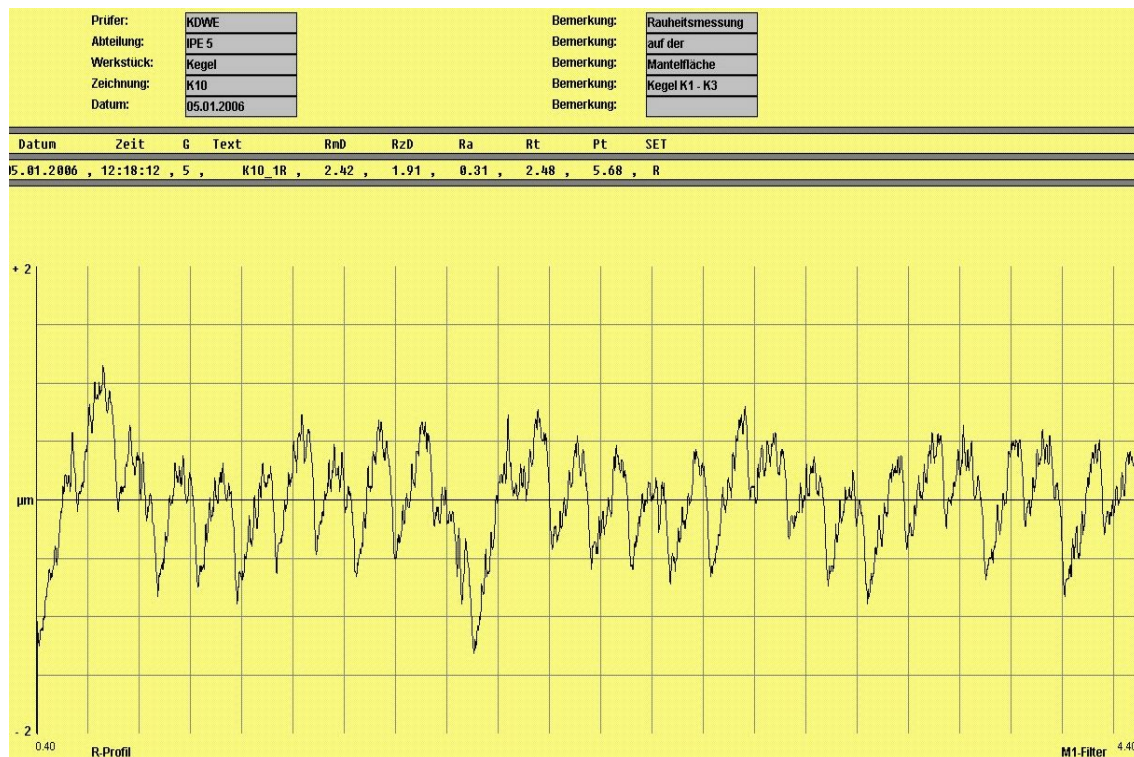


Abbildung 6-23: Rauheitsprofil Probe K10 (oberer Teil)

Der untere Teil des Kegels zeigt bei der Verwendung eines 2 mm Torusfräasers (Radius 0,2 mm) ein anderes Rauheitsprofil (Abbildung 6-24). Die wesentlich schlechtere Transparenz schlägt sich auch in dem R_a -Wert nieder. Dieser liegt bei $2,52 \mu\text{m}$.

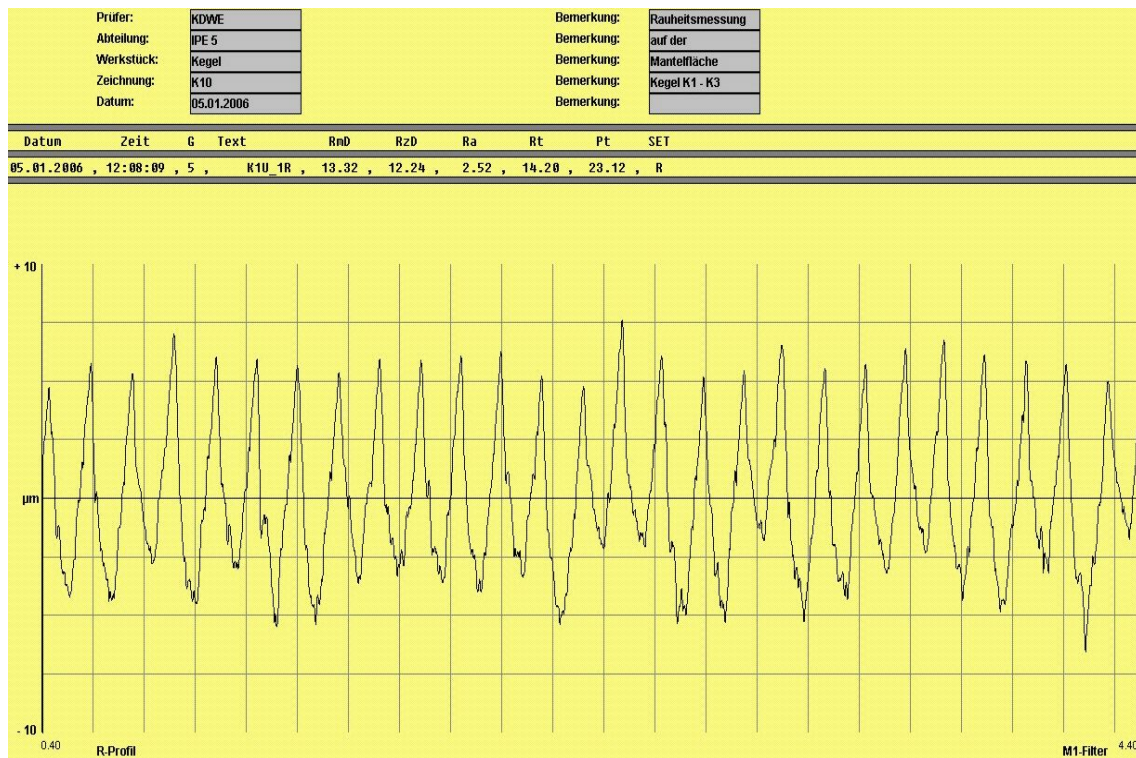


Abbildung 6-24: Rauheitsprofil Probe K10 (unterer Teil)

Aus den Untersuchungen der Rauheitsprofile für die Proben lässt sich ableiten, dass die Transparenz von der Rauheit abhängt. Die daraus zu fordernde niedrige Rauheit ist aber sehr stark von den verwendeten Schnittparametern und eingesetzten Werkzeugen abhängig. Bei besonders kleinen und z.T. schwierigen Geometrien ist der Einsatz von größeren Fräserdurchmessern nicht mehr möglich. Das hieraus entstehende Qualitätsdefizit lässt sich nur durch ein stärkeres manuelles Nacharbeiten beheben.

6.4 Einfluss des Werkstoffes

Wie bereits in Kapitel 3.4 beschrieben, werden 20 mm Plattenstärken von Makrolon (PC) industriell nicht hergestellt. Hieraus ergibt sich bereits ein wesentlicher Nachteil. Wenn vorwiegend Modelle schichtweise aufgebaut werden sollen, empfiehlt es sich immer, das Modell in möglichst wenige Schichten zu schneiden, d.h. eine maximale Plattenstärke zu verwenden. Aus diesen Gründen ist es nicht möglich, die aus PMMA gefertigten Formelemente auch mit PC herzustellen. Um dennoch eine Aussage bezüglich der spannenden Bearbeitung und der Transparenz von PC zu erhalten, sollen anhand einer einfachen Untersuchung die wesentlichen Merkmale gegen-

über PMMA gezeigt werden. Für diesen Zweck wurden drei Nuten (8 mm Breit, 3 mm Tief) aus einem Block mit unterschiedlichen Vorschüben herausgefräst. Der 8 mm Schaftfräser fährt dabei von außen in das Werkstück herein und auch vollständig mit vollem Werkzeugumfang aus dem Werkstück heraus. Tabelle zeigt die gefahrenen Parameter.

	Nut oben	Nut mitte	Nut unten
Fräser Ø (mm) u. Typ	8, Schaft	8, Schaft	8, Schaft
n (1/min)	9000	9000	9000
v_f (mm/min)	250	500	1000
v_z (mm/min)	150	150	150
Strategie	Zick	Zick	Zick
a_p (mm)	3	3	3

Tabelle 6-11: Fräsparameter

Abbildung 6-25 und Abbildung 6-26 zeigt den Vergleich beider Probekörper. Bereits der erste optische Eindruck zeigt, dass der Werkstoff PC wesentlich „dunkler“ wirkt als PMMA. Dies lässt sich auch aufgrund des geringeren Transmissionsgrades ableiten. Bei beiden Proben sind Abdrücke des Fräasers kurz vor dem Austreten aus dem Werkstück zu erkennen, bei der linken Probe ist dies deutlicher zu erkennen.



Abbildung 6-25: Probe aus PMMA (links) und aus PC (rechts)

Subjektiv scheint die rechte Probe transparenter zu sein, die linke Probe wirkt wesentlich milchiger. Wird allerdings ein Schriftzug hinter die Nut gehalten, so lässt sich optisch erkennen, dass der Werkstoff PC die Transparenz deutlicher verliert als PMMA.



Abbildung 6-26: Probe aus PMMA und PC mit Schriftzug

Das beste Resultat erzielte auch hier die Probe aus PMMA mit einem Vorschub von 250 mm/min.

Ein weiterer Unterschied ergibt sich, wenn die Rauheit gemessen wird. Durch die letzten Ergebnisse lässt sich erwarten, dass der Rauheitswert der Probe aus PC schlechter sein muss als der bei PMMA, da hier auch die Transparenz schlechter ist. Abbildung 6-27 zeigt das Ergebnis der Rauheitsmessung. Wie zu erkennen ist, wird durch die Rauheitsprüfung beim Werkstoff PC ein R_a von $0,95 \mu\text{m}$ gemessen. Im Gegensatz dazu ergibt sich bei einer Messung des Werkstoffes PMMA (Abbildung 6-28) ein Wert von $0,24 \mu\text{m}$, also um rund 75 % niedriger.

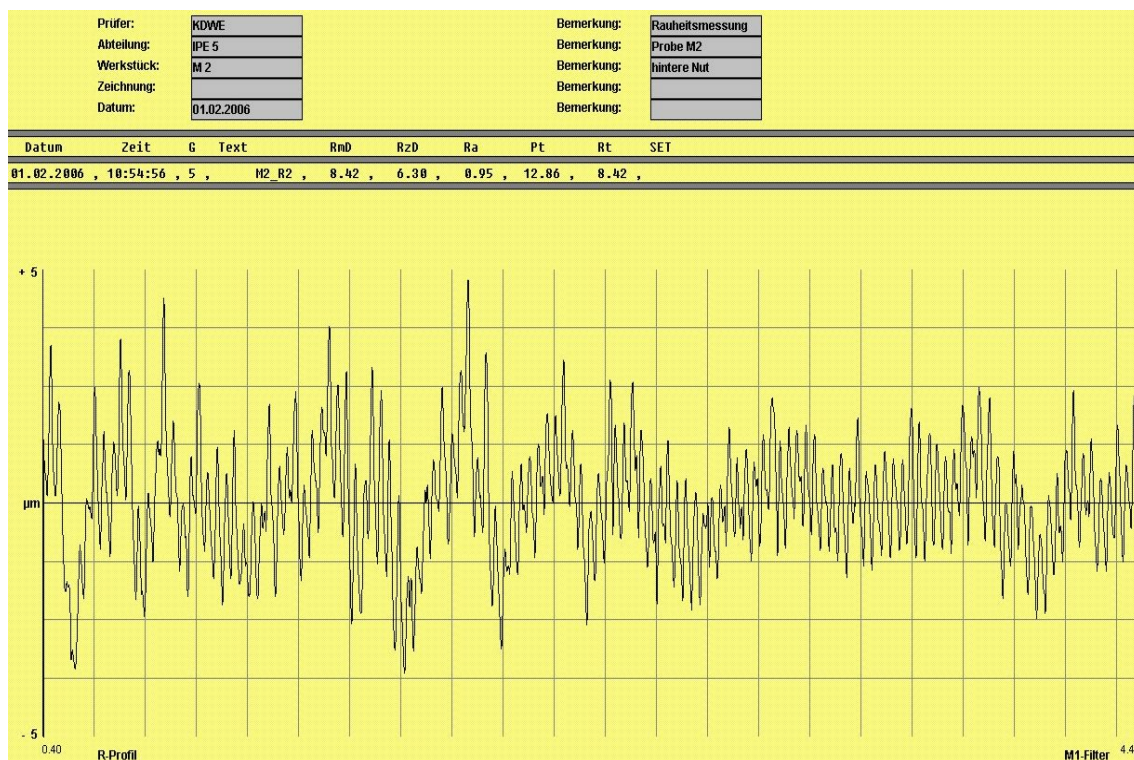


Abbildung 6-27: Rauheitsmessung der oberen Nut (PC)

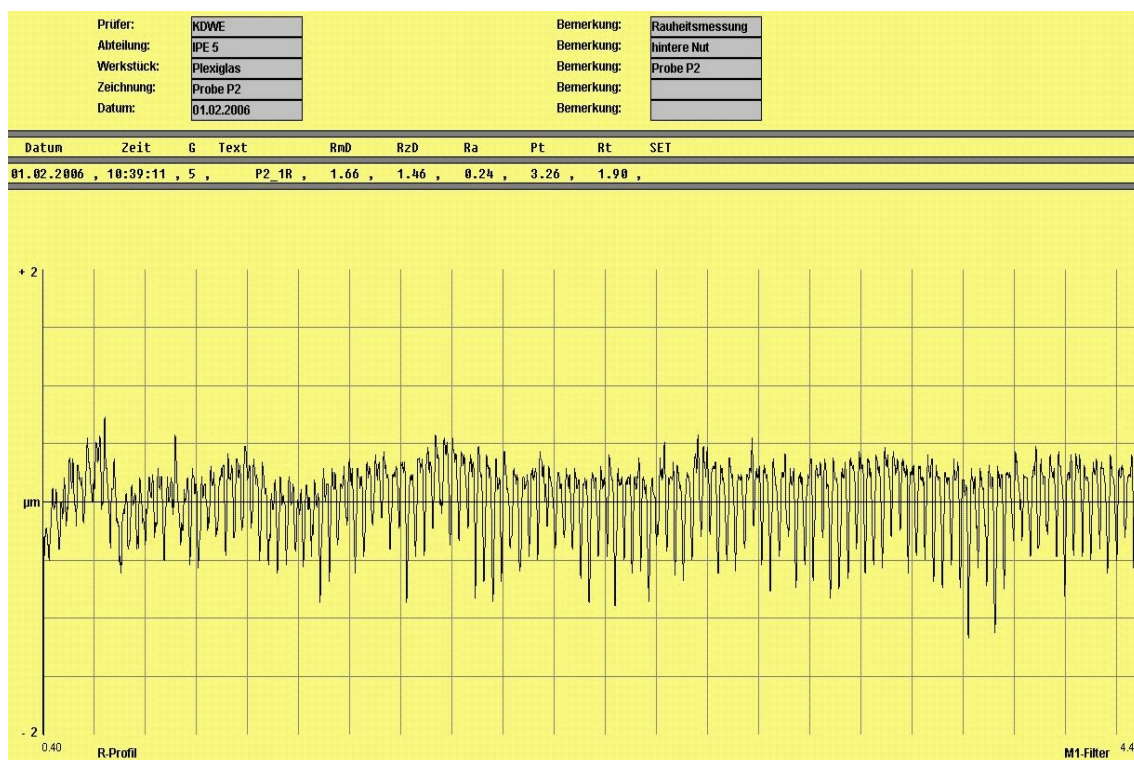


Abbildung 6-28: Rauheitsmessung der oberen Nut (PMMA)

Aus diesen Ergebnissen lässt sich ableiten, dass der Werkstoff PMMA aufgrund der vorliegenden Ergebnisse anderen Werkstoffen als Modellbauwerkstoff vorzuziehen ist. Abschließend sei zum Vergleich die Rauheit an einer nicht zerspannten Oberfläche dargestellt. Hier wird ein R_a von $0,03 \mu\text{m}$ gemessen.

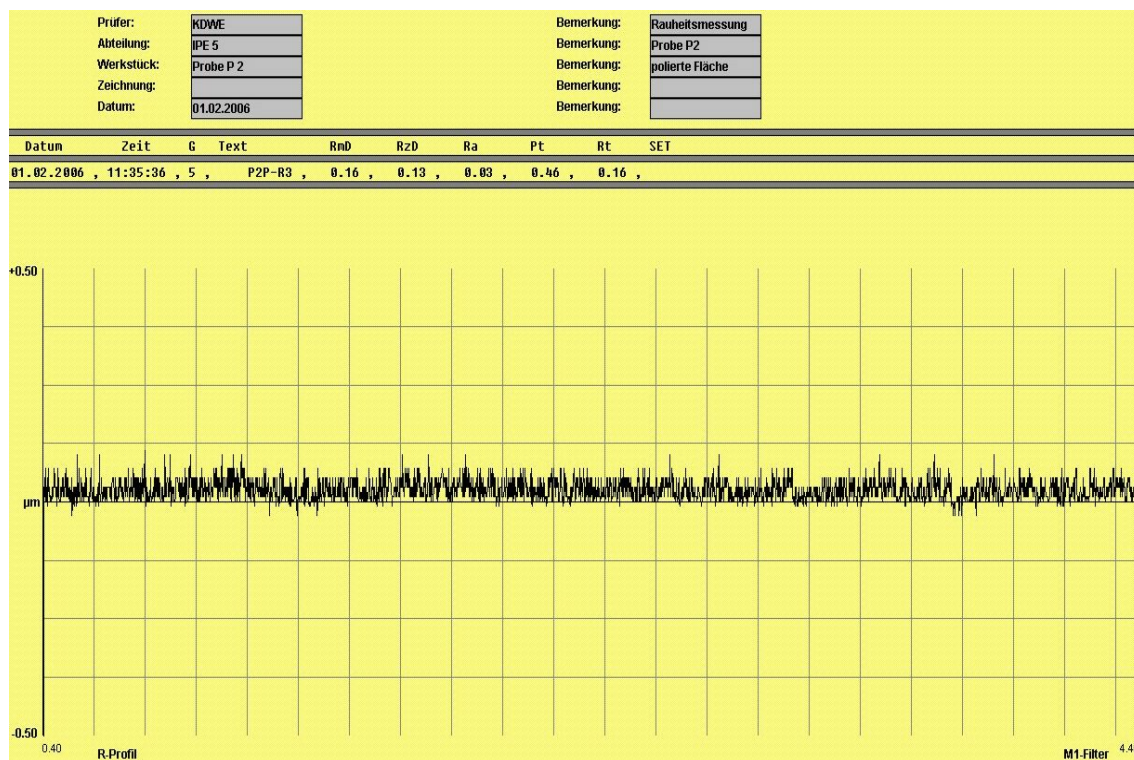


Abbildung 6-29: Rauheitsmessung einer nicht zerspannten Oberfläche

6.5 Ergebnisse

In den vorherigen Kapiteln wurden 2,5D und 3D-Formelemente untersucht, um im Hinblick auf das Spanen von transparenten Kunststoffen optimale Schnittparameter sowie Bearbeitungsstrategien zu erhalten. Bei den verwendeten Formelementen handelt es um kleine Geometrie Größen, die den Einsatz kleiner Fräser erfordern. Die folgenden Ergebnisse beziehen sich auf den Einsatz des Modul CAMWorks. Es können folgende Ergebnisse für das Spanen (Schlichten) von Plexiglas festgehalten werden:

➤ Allgemein

- Die in der Literatur beschriebenen Schnittparameter weisen sehr große Unterschiede auf
- Die erreichbaren Schnittparameter sind durch die max. Drehzahl limitiert
- Die erreichbaren Schnittparameter sind durch die kleinen Fräserdurchmesser limitiert

Ergebnis der Untersuchungen:

➤ Werkstück

- Plexiglas ist ein spröder Werkstoff, es besteht die Gefahr von Ausbrüchen
- Es gibt keine nennenswerten Unterschiede zw. Plexiglas XT und GS hinsichtlich der Transparenz sowie der spanenden Bearbeitung
- Plexiglas ist Makrolon vorzuziehen

➤ Werkzeug

- Die Standzeit eines Einschneiders ist gering, die Transparenz nimmt ab
- Die Verwendung eines Zweischneders ist durchaus zu empfehlen
- Bei 3D-Geometrien sind Kugelfräser den Torusfräsern vorzuziehen
- Es ist der maximale Fräserdurchmesser, abhängig von der Geometrie, zu verwenden
- Das verwendete Werkzeug bestimmt die Schnittparameter

➤ **Werkzeugmaschine**

- Die Drehzahl einer Werkzeugmaschine bestimmt die Schnittparameter
- Die Werkzeugwege können nicht immer richtig übersetzt werden (Kreisinterpolation)
- Die tatsächliche Fertigungszeit liegt fast immer über der theoretischen Zeit

➤ **Schnittbedingungen**

- Das verwendete Werkzeug bestimmt die Schnittparameter
- Bei der spanenden Bearbeitung ist ein Kühlschmierstoff zu verwenden
- Es ist die maximale Drehzahl ($n = 9000 \text{ 1/min}$) zu verwenden
- Die Schnitttiefe a_p sollte nicht größer als der halbe Fräserdurchmesser betragen
- Für das Schlichten von 2,5D-Features empfiehlt sich ein Vorschub v_f von 250 mm/min
- Für das Schlichten von 3D-Features (z.B. Rampe) ist ein Vorschub von 250 (bis 500) mm/min zu empfehlen
- Es ergeben sich Schnittgeschwindigkeiten v_c von 56 bis 226 m/min
- Es ergibt sich ein Vorschub pro Zahn f_z von 0,014 bis 0,05 mm/Zahn

➤ **Bearbeitungsstrategie**

- Das Schlichten sollte bei einem Aufmaß von 0,4 mm geschehen
- Für das Schlichten von 2,5D-Features ist die Bearbeitungsstrategie *Zick* zu bevorzugen
- Für das Schlichten von 3D-Features ist die Bearbeitungsstrategie *Z-Ebene* oder *Schnitt* zu bevorzugen
- Die Schrittweite in Z-Richtung sollte 0,1 mm betragen
- Fräsaufgaben sollten in mehrere Frässtrategien aufgeteilt werden (Selektion bestimmter Flächen)
- Eventuell einfügen von Skizzen, um den Fräsbereich zu vergrößern
- Der An- und Abfahrtsweg sollte möglich außerhalb des Werkstückes sein, um Fräserabdrücke zu reduzieren

Im Prinzip lassen sich diese Ergebnisse weitestgehend auf die Verwendung des Modul Millit übertragen, wenngleich sich ein Grossteil der Parameter hier nicht individuell einstellen lässt.

7 Anwendungsbeispiele

Die in der vorliegenden Arbeit erhaltenen Ergebnisse für das Fräsen transparenter Kunststoffe werden anhand von zwei Praxisbeispielen dargestellt.

7.1 Miniaturturbine

Die gewonnenen Ergebnisse wurden an dem Gehäusedeckel einer Miniaturturbine übertragen. Die Miniaturturbine wurde nach Vorgaben eines Unternehmens rechnerintern abgebildet und anschließend gefertigt. Die geometrische Gestalt dieser Turbine ist in Abbildung 7-1 dargestellt. Links ist der Rotor im Gehäuseboden dargestellt, rechts der Deckel mit dem Strömungskanal. Das Turbinengehäuse besitzt einen Durchmesser von 94 mm und eine Höhe von 35 mm. Der Rotor wurde mit einem generativen RP-Verfahren gefertigt. Der Gehäuseboden (Höhe 15 mm) wurde aus Aluminium, der Deckel (Höhe 20 mm) aus Plexiglas spanend gefertigt.

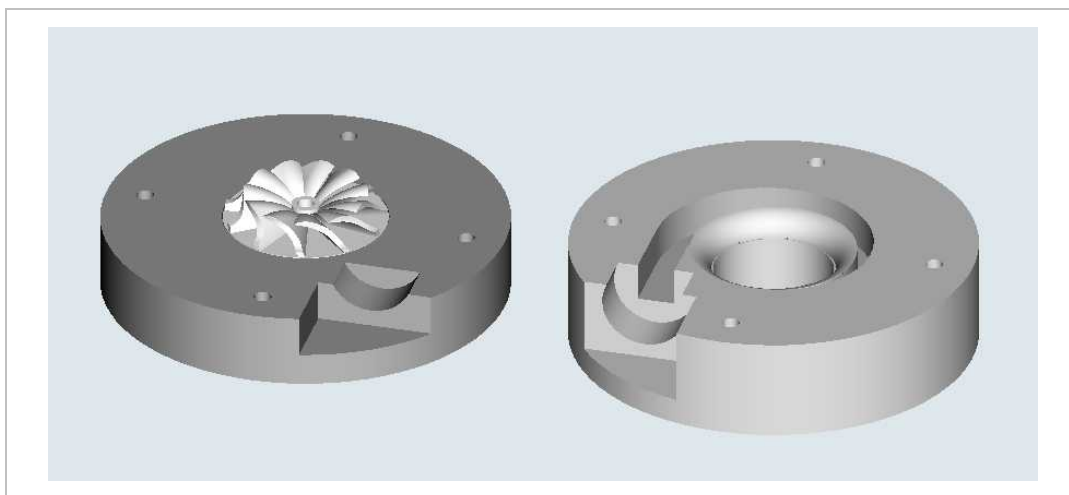


Abbildung 7-1: Darstellung Miniaturturbine

Zur Erzeugung der Werkzeugwege wurde das Modul CAMWorks benutzt. Neben einfachen Formelementen besitzt der Gehäusedeckel Freiformflächen. Abbildung 7.2 zeigt einen Schnitt durch den Gehäusedeckel. Zu erkennen sind die Verrundungen sowie der Strömungskanal, welcher seinen Querschnitt von 9,2 x 9,3 mm auf 2 x 2 mm zum Ende hin erheblich verkleinert.

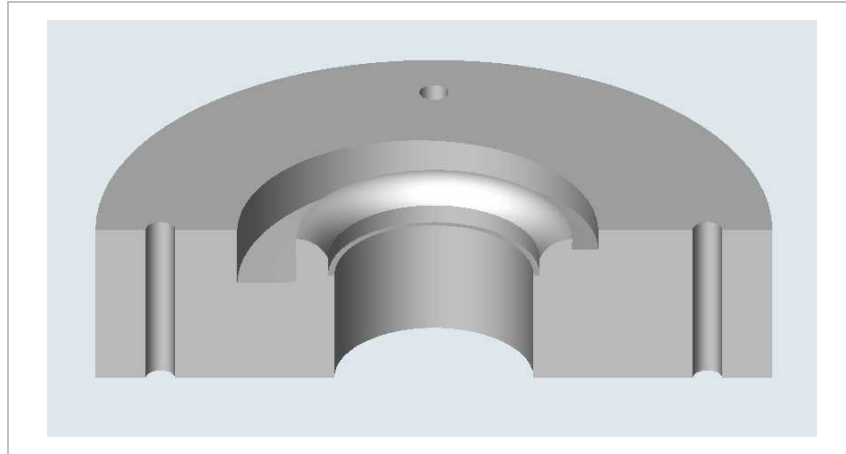


Abbildung 7-2: Gehäusedeckel im Schnitt

Der Deckel der Turbine konnte ohne Ausbrüche gefertigt werden. Wie in Abbildung 7-3 ersichtlich ist, sind allerdings die feinen Stufungen zu erkennen, welche bei einer Schrittweite von 0,1 mm auftreten. Die Verwendung eines großen Kugelfräasers konnte aufgrund der Abmessungen des Strömungskanals und des Querschnittes nicht realisiert werden. Die tatsächliche Fertigungszeit (4 Stunden und 20 Minuten) lag 5,4 % über der theoretischen Fertigungszeit. In dem Gehäuse wurde anschließend ein Gewinde geschnitten, um erste praktische Versuche mit Druckluft durchführen zu können.



Abbildung 7-3: Gehäusedeckel der Turbine

Es muss an dieser Stelle hingewiesen werden, dass die Implementierung von Bauteilen unterschiedlicher RP-Verfahren zu einer Baugruppe risikoreich ist, da die geforderten Genauigkeiten durch generative Verfahren oft nicht realisiert werden können. Abbildung 7-4 zeigt das Funktionsmodell der Turbine.



Abbildung 7-4: Fertige Turbine

Durch das Funktionsmodell konnten nach den Versuchsläufen erste Berechnungen überprüft und korrigiert werden.

7.2 Nasenmodell

Modelle spielen nicht nur bei technischen Anwendungen, wie Kapitel 2.3 und das vorherige Beispiel zeigen, eine große Rolle, sondern werden vermehrt im medizinischen Bereich eingesetzt [Zhuo 2004, Sauer et al. 2005]. Dabei greifen die Anwender nicht auf ein modelliertes 3D-CAD-Modell zurück, sondern nutzen die bildgebenden Verfahren (Computer- und Kernspintomographie), um mit Hilfe einer Software einen digitalen Volumenkörper zu erzeugen. Dieser kann anschließend mit den RP-Verfahren gefertigt werden. Wie bereits in Kapitel 2.1 erwähnt, dienen diese Modelle der Operationsplanung bestimmter Knochen oder Weichteile. Darüber hinaus soll der bisherige Nutzen dieser Anschauungs- und Funktionsmodelle erweitert werden, indem Funktionsmodelle auch für Strömungsuntersuchungen eingesetzt werden. Beispiel hierfür sei die Naseninnengeometrie.

7.2.1 Zielsetzung und Stand der Technik

Die nasale Erwärmung, Befeuchtung und partielle Reinigung der Atemluft stellt eine der zentralen Aufgaben der Nase dar. Die meisten Atemstörungen in der Nase lassen sich auf eine abnormale Strömung durch die Nase zurückführen. Je nach Störung kann die Nasengeometrie operativ reorganisiert werden. Diese Operationen gehören mit zu den häufigsten Eingriffen. Durch die Tatsache, dass 30 % bis 50 % der Patienten unzufrieden mit dem Eingriff sind, ergeben sich hohe Zusatzkosten für Folgeeingriffe [Valvoda et al. 2004]. Die Auskleidung der Nase mit Schleimhaut dient der Klimatisierungsfunktion ebenso wie die Dynamik von Schwellung und Abschwelung, insbesondere im Bereich der Nasenmuscheln.

Eine Behinderung der Nasenatmung (siehe Abbildung 7.5) führt für den Patienten oft zu einer Riechstörung, einer Einschränkung der Leistungsfähigkeit und in erheblicheren Fällen auch zum Ausschluss der Nase aus dem Atemstrom mit fehlender Klimatisierung der Atemluft (Mundatmung) [Keck et al. 2000].

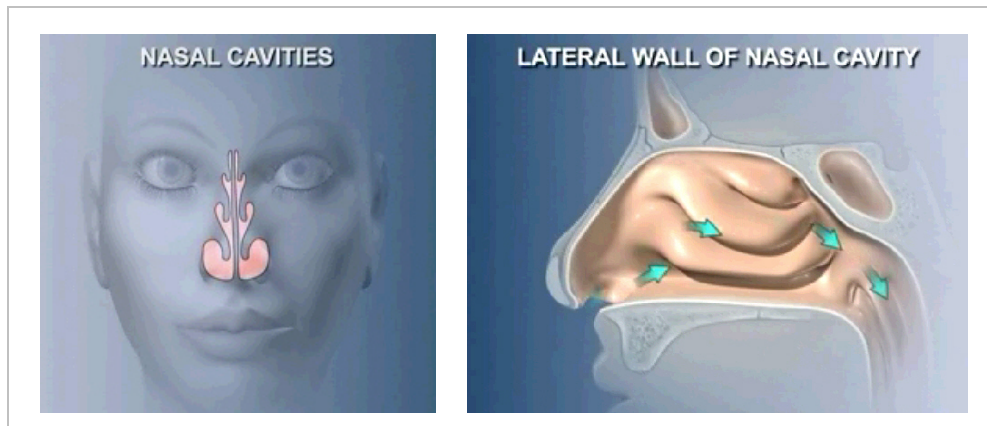


Abbildung 7-5: Schnittdarstellung durch die Nase

Neben medizinischen Untersuchungen [Lamprecht et al. 2005] gibt es eine Vielzahl von ingenieurwissenschaftlichen experimentellen und numerischen Untersuchungen, die sich mit der Ermittlung des Strömungsfeldes in der Nase befassen. Eine Möglichkeit ist die Strömungssimulation. Mit Hilfe einer Software werden Oberflächenmodelle der Nasenhöhlen aus den CT-Schichtbildern rekonstruiert. Anschließend wird das Strömungsvolumen in finite Volumen diskretisiert. Auf diese Weise kann eine Simulation der Nasenströmung vorgenommen werden, die auf patientenspezifischen Daten beruht. Ziel ist es, dem Chirurgen Unterstützung in der Funktionsdiagnostik zu geben. Aufgrund des erheblichen numerischen Aufwands sind vertretbare Rechenzeiten nur auf leistungsfähigen Rechnern zu erzielen [Valvoda et al. 2004].

Eine physische Nachbildung der hochkomplexen Struktur des Inneren einer menschlichen Nase ist in vorangegangenen Arbeiten [z.B. Masing 1967, Hopkins et al. 2000, Kelly et al. 2000, Kim u. Chung 2004] nach verschiedenen Prinzipien vorgenommen worden. Im Zentrum des Interesses und der Untersuchungen steht die Auflösung der räumlichen Geschwindigkeitsfelder innerhalb des Modells. Hier kommt vorrangig für die Messung die Particle-Image-Velocimetry (PIV) [Hopkins et al. 2000, Kim u. Chung 2004] infrage. Ausgehend von einem Volumenmodell werden die Funktionsmodelle hergestellt. Ein zweistufiges Verfahren wurde von Kim und Chung angewandt (Abbildung 7-6). Ausgehend vom virtuellen Modell wurde im ersten Schritt die komplexe Geometrie der Nasenhaupthöhle aus einem wasserlöslichen Material auf Basis eines generativen Fertigungsverfahrens erzeugt. Dieser Körper wurde dann als Kern in einem zweiten Schritt mit transparentem Silikon umschlossen und anschließend wieder herausgespült.

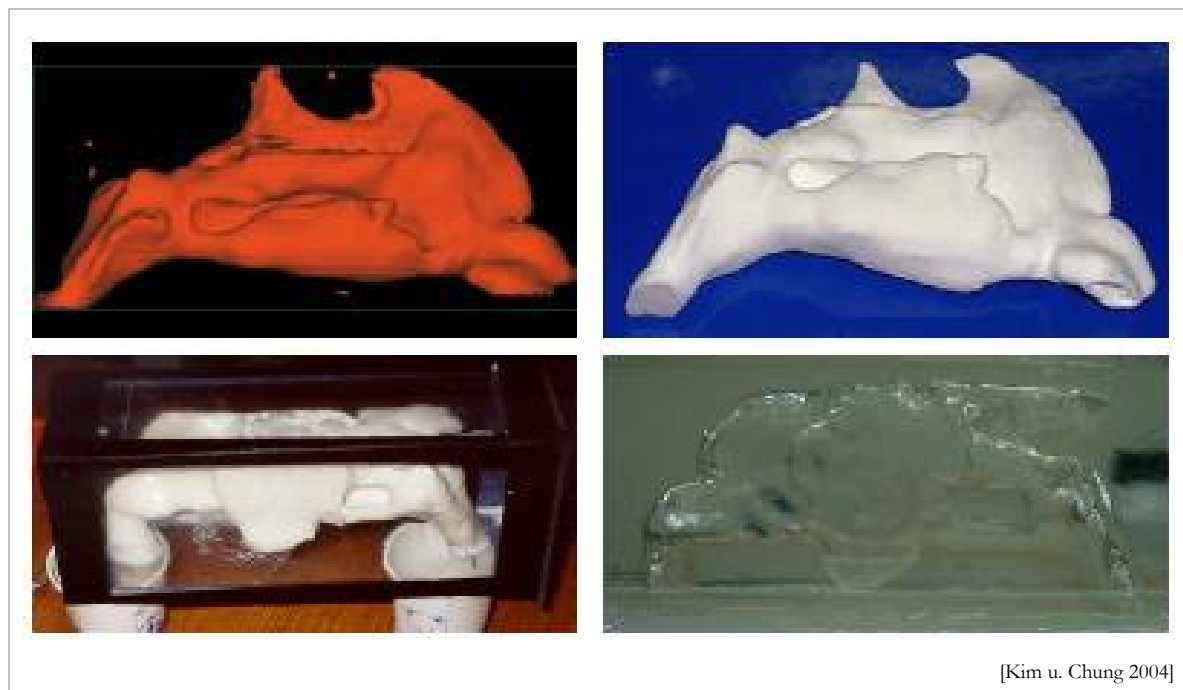


Abbildung 7-6: Verfahrensschritte zur Modellherstellung

Zur Geschwindigkeitsmessung wurde eine Mischung aus Wasser und Glycerin als Fluid verwendet und mit Partikeln versetzt [Kim u. Chung 2004]. Die Mischung hat dabei die gleiche Brechzahl wie das Funktionsmodell. Wenn der Körper mit diesem Fluid durchströmt wird, entsteht an den Trennflächen des transparenten Materials keine Brechung, so dass nahezu fehlerfreie optische Messungen durchgeführt werden können, da das Funktionsmodell in dieser Flüssigkeit praktisch unsichtbar ist. Allerdings bestehen bei diesen Fertigungsverfahren Einschränkungen in Bezug auf die Transparenz der erzeugten Bauteile, die für die optischen Untersuchungen unabdingbar sind.

Während die PIV-Messungen insbesondere eine hohe räumliche Auflösung bieten können, kann der Atemzyklus an einer festen Stelle durch Druck- und Temperaturmessungen charakterisiert werden. Eine hier durchgeführte Arbeit [Melker 2004] zeigt folgende Abbildung 7-7. Der 3D-Volumenkörper der Nase, wieder abgeleitet aus den bildgebenden Verfahren, wurde im Rechner mit 16 Bohrungen versehen, die von außen nach innen bis zur Grenzfläche verlaufen. Das Modell wurde schließlich mit der Stereolithographie hergestellt und die Sensoren implementiert.

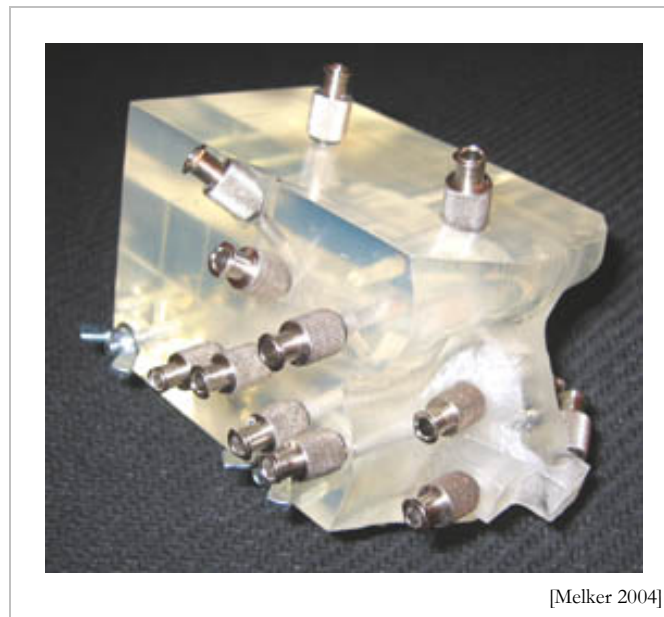


Abbildung 7-7: Nasenmodell mit Sensoren

Nachteil dieser Lösung ist, dass lokale Änderungen der Geometrie stets die Fertigung eines neuen Modells beinhaltet. Dies ist sehr aufwendig und nicht zweckmäßig. Aus diesem Grund soll hier ein anderer Ansatz vorgestellt werden.

7.2.2 Modulares Nasenmodell

Wie bereits in dieser Arbeit beschrieben, weisen Modelle aus einzelnen gefrästen Schichten einen erheblichen Vorteil auf: sie erlauben nicht nur den Austausch einzelner Schichten, sondern zudem auch die in den experimentellen Strömungsuntersuchungen vorgesehenen Sonden, die nach Bedarf an festzulegenden Messorten in das Modell implementiert werden. Auf diese Weise kann eine Überfrachtung des Modells mit Messsonden und Messpunkten und die damit einhergehende Beeinflussung der Strömung weitestgehend vermieden werden. Es lassen sich folgende Schritte für die Erstellung des Modells festhalten:

- 1.) Festlegung der Modellschnitte zur Erzeugung der Modellschichten (Abbildung 7.8), d.h.
 - Aufteilung der Geometrie in Schichtmoduln,
 - Versuchs- und fertigungsgerechte Modulbildung,
 - Adaptives Modell.

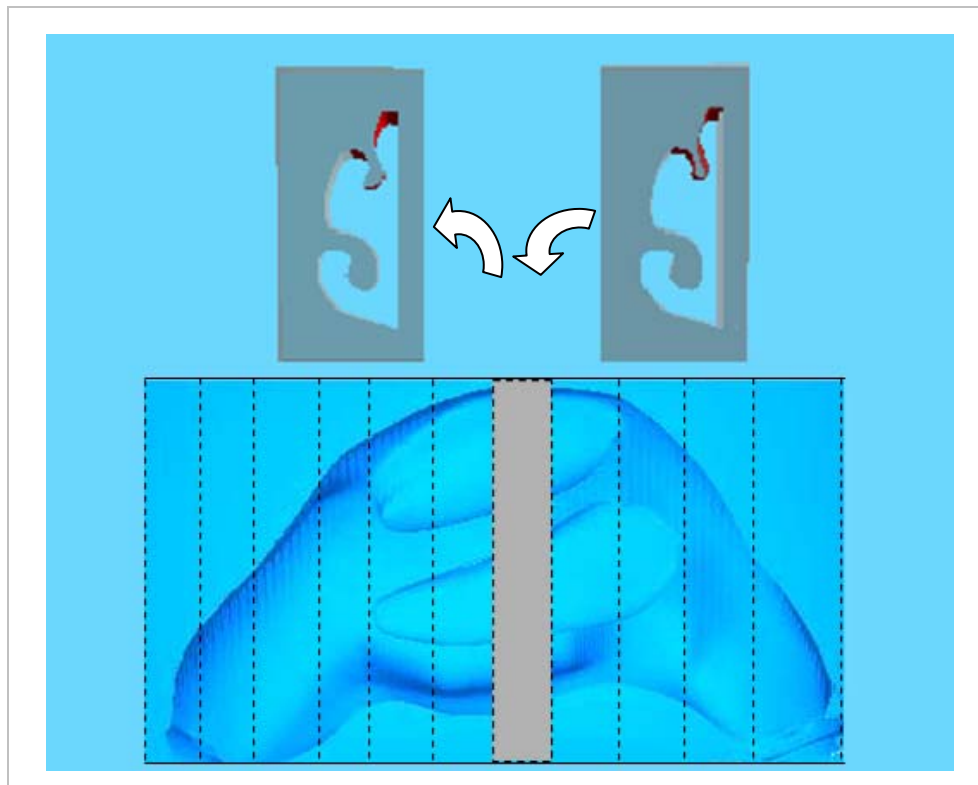


Abbildung 7-8: Schichtweise aufgebautes Nasenmodell (schematisch)

- 2.) CNC-Fräsen der einzelnen Modellschichten.
- 3.) Bei lokalen Geometrieänderungen (Dynamik, Vergleich prä-postoperativ) nur Austausch der entsprechenden Schichten notwendig, d.h.
 - Gleiche Bauteile werden nur einmal gefertigt,
 - Unterschiedliche Bereiche werden als austauschbare Moduln hergestellt,
 - Reversibles Fügen.
- 4.) Austauschbare Moduln für verschiedene Messsonden und -orte.

Die prinzipielle Tauglichkeit des Verfahrens bei Verwendung transparenter Werkstoffe wurde zwischenzeitlich nachgewiesen [Weyers u. Sen 2004]. Zur Erzeugung der einzelnen Schichten wurde ein Datensatz im STL-Format (Dateigröße 435 MB) verwendet, welcher aus den Schichtaufnahmen konvertiert worden ist. Das Modell wurde für eine spanende Bearbeitung um den Faktor 5 vergrößert. Das Modell wurde anschließend virtuell in sechs Schichten (gewählte Schichtdicken 7, 11 und 14 mm) geschnitten. Daraus ergaben sich weitere Abmessungen von 92

mal 24,5 mm. Zum Erzeugen der Maschinewege wurde das CAM-Modul Millit verwendet. Für die Bearbeitung wurden aufgrund der Geometrie und der Zugänglichkeit zum Schrappen ein 3 mm, zum Schlichten ein 2 mm Torusfräser verwendet. Als sinnvolle Bearbeitungsstrategie wurde *Konturen* mit einer Z-Schrittweite beim Schlichten von 0,1 mm ausgewählt. Die Gesamtfertigungszeit betrug 16 Stunden und 30 Minuten. Im Durchschnitt lag die Fertigungszeit für die einzelnen Schichten um ca. 1,2 % höher als die theoretische Fertigungszeit. Für eine erste Fixierung wurden die Schichten in einen Sockel eingebettet. Abbildung 7-9 zeigt das Ergebnis der einzelnen gefrästen Schichten. Die Schichten konnten ohne Ausbrüche gefertigt werden.



Abbildung 7-9: Modell der Naseninnengeometrie

Wie in obiger Abbildung zu erkennen ist, lassen sich die Konturen der Naseninnengeometrie gut fräsen. Entscheidend für das Ergebnis ist die gewählte Schichtdicke d.h. die Zugänglichkeit des Werkzeuges. Gerade am Eintritt weist die Geometrie eine komplexe Struktur auf. Hier müsste im Prinzip ein Fräser mit einem kleineren Durchmesser gewählt oder die Schichtdicke von 11 auf z.B. 5 mm reduziert werden. Hier ist vom Anwender ein Optimum zu finden. Darüber hinaus ist ersichtlich, dass auch hier keine vollständige Transparenz erzielt werden kann. Es sollte weiterhin geklärt werden, ob für den Einsatz in einem Flüssigkeitsbad mit der gleichen Brechzahl die ein-

zelenen Schichten manuell nachgearbeitet werden müssten, oder ob die Oberflächengüte der Schichten ausreichend ist. Um dieses zu untersuchen wurde eine Mischung aus Wasser und Glycerin mit der Brechzahl von 1,491 angesetzt. Anschließend wurde das fixierte Modell in das Flüssigkeitsbad getaucht. Wie Abbildung 7-10 zeigt, sind die Konturen kaum noch zu erkennen. Zu erkennen sind lediglich die Kanten der Schichten. Das Ergebnis ist zudem stark von der Lichtquelle abhängig.



Abbildung 7-10: Nasenmodell im Fluidbehälter

Die Ausführungen zeigen, dass es nur bedingt notwendig ist, dass die Oberflächen einen kleinen R_a -Wert besitzen müssen. Die durch das spanende Bearbeiten entstehenden Oberflächenrauheiten werden durch die Flüssigkeit benetzt und sind deshalb praktisch unsichtbar. Da weniger manuelle Nacharbeit anfällt, reduziert sich dementsprechend der gesamte Aufwand. Dieses richtet sich aber nach dem jeweiligen Einsatzzweck.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Dem Einsatz transparenter Anschauungs- und Funktionsmodellen für z.B. Strömungsuntersuchungen kommt eine wesentliche Bedeutung zu. Nicht nur in Bereichen des Maschinenbaus, sondern auch für medizinische Untersuchungen werden diese Modelle verstärkt benötigt. Unter Einbeziehung der generativen Fertigungsverfahren wird aufgezeigt, dass die Forderung nach transparenten Modellen nur durch das quasi-generative Verfahren Fräsen erfüllt werden kann. Es wird vor allem dann deutlich, wenn gefordert wird, dass ein Modell schichtweise aufgebaut werden soll. Nur durch solch einen Ansatz lässt sich gewährleisten, dass einzelne Schichten getaucht werden können, um z.B. lokale Veränderung einer Geometrie zu untersuchen.

Die Überprüfung des wissenschaftlichen Sachstandes zeigt, dass die zur Verfügung stehende Information zum Spanen von transparenten Kunststoffen, insbesondere für das am häufigsten eingesetzte Plexiglas (PMMA), stark voneinander abweichen und konkrete Parameter nicht vorgegeben werden. Zudem wird verdeutlicht, dass das Ergebnis nicht nur abhängig ist von den gewählten Schnittparametern, sondern auch weitere Einflussgrößen, wie die Bearbeitungsstrategie, einen erheblichen Einfluss auf die Oberflächengüte und damit auf die Transparenz besitzen. Im Bereich des Datenaustausches zwischen Datenlieferant und Fertigung treten zudem Defizite auf, da hier deutlich unterschieden werden muss, ob die Erzeugung der notwendigen Werkzeugwege durch ein CAD-internes NC-Programm oder durch ein CAD-externes NC-Programm durchgeführt wird.

Im Rahmen einer Untersuchung haben sich als stärkste Einflussparameter in der Fertigung von Modellen aus PMMA mittels Fräsen herauskristallisiert:

- Das zu verwendende Werkzeug
- Die richtigen Schnittbedingungen
- Die Bearbeitungsstrategien
- Defizite in der Aufbereitung der Fertigungsdaten

Im Hinblick auf eine verbesserte Nutzung werden Ansätze für einen verbesserten Verfahrensablauf entwickelt und formuliert. Die dabei erzielten Ergebnisse sind gültig für kleine Geometrien (Werkzeugdurchmesser zwei bis acht Millimeter) sowie einer maximalen Drehzahl von 9000 1/min des Bearbeitungszentrums.

Ausgehend von einfachen 2,5D-Formelementen werden erste Kenngrößen der jeweiligen Einflussparameter verifiziert. Durch die Verwendung von Geometrien eines Prüfwerkstückes werden durch den Übergang zu 3D-Formelementen weitere Ansätze und Abläufe der CAD/CAM Technologie untersucht und optimiert. Die dabei auftretenden Mängel werden aufgezeigt und die erzielten Ergebnisse zusammengefasst. Daraus ableitend werden Empfehlungen ausgesprochen. Darüber hinaus findet ein zusätzlicher Vergleich mit dem Werkstoff Polycarbonat (PC) statt. Die Vorzüge der Verwendung von PMMA werden durch Rauheitsmessungen unterstrichen.

Am Beispiel einer Miniaturturbine werden die Ergebnisse der entwickelten Ansätze verdeutlicht. In einem weiteren Beispiel einer Naseninnengeometrie können die Ergebnisse ebenfalls übertragen werden.

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass das quasi-generative Rapid Prototyping-Verfahren Fräsen im Hinblick auf die Herstellung von komplexen Modellen noch ungenutztes Potenzial besitzt. Unter Berücksichtigung der in dieser Arbeit entwickelten Empfehlungen lassen sich die Möglichkeiten der Herstellung von Modellen aus PMMA mittels Fräsen deutlich verbessern. Im Ergebnis lassen sich die Modelle mit einer wesentlich besseren Oberflächenqualität fertigen. Die vielseitige Nutzung von Fräsmaschinen im Rahmen der klassischen Fertigungstechnik lassen die Möglichkeit einer Fertigung von komplexen Modellen mittels Fräsen auch wirtschaftlich erscheinen. Vor diesem Hintergrund kann sich das Fertigen mittels Fräsen nicht nur zu einem konkurrenzfähigen Fertigungsverfahren zu den generativen Rapid Prototyping-Verfahren entwickeln, sondern auch durch das Bearbeiten aller spanbaren Werkstoffe abheben. Für die Zukunft sollten die ermittelten Ergebnisse auf ein 5-Achs-Bearbeitungszentrum übertragen und weiter untersucht werden.

Literatur

- [1zu1prototypen 2006] www.1zu1prototypen.com
- [Ahlborn 2005] www.ahlborn-kunststoffe.at
- [Assmann 2003] **Assmann, B.O.:** *Herstellung hochgenauer Prototypen mittels Fräsen als quasi-generativem Rapid Prototyping-Verfahren*, Dissertation
Institut für Produkt Engineering, Produktionstechnologie und Produktentwicklung, Universität Duisburg-Essen, 2003
- [Awiszus et al. 2004] **Awiszus, B.; Dürr, H.; Matthes, K.J.; Bast, J.:** „*Grundlagen der Fertigungstechnik*“, Hanser Verlag, 2004
- [Bergers 2005] **Bergers, D.:** *Rapid and Virtual Prototyping*, Skriptum, Institut für Produkt Engineering, Produktionstechnologie und Produktentwicklung, Universität Duisburg-Essen, 2005
- [CNC-Modellbau 2005] www.CNC-Modellbau.de
- [DeGaspari 2002] **DeGaspari, J.:** *Rapid Evoluten – New materials and process improvements are stretching the boundaries of prototyping techniques*, Mechanical Engineering, Vol.124/No.3, 48-52, 2002
- [Deskproto 2006] www.deskproto.com
- [Deters 2004] **Deters, L.:** *Grundsätzliches zur Reibung und Verschleiß in der technischen Anwendung*, Maschinenbau/Magdeburger Wissenschaftsjournal 1/2004
- [Domininghaus 1998] **Domininghaus, H.:** *Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften*, VDI Springer, 5. Auflage, 1998
- [DSM 2001] www.dsmsomos.com

- [Ehrlenspiel 2003] **Ehrlenspiel, K.:** *Integrierte Produktentwicklung – Methoden für Prozessorganisation, Produkterstellung und Konstruktion*, Hanser Verlag, 2. Auflage, 2003
- [Franz 2001] **Franz, M.:** *Methode zur Unterstützung der Entscheidung zwischen generativer oder erosiver Fertigung bei der Herstellung von Formeinsätzen*, Diplomarbeit, Fachbereich Maschinenbau, Fachhochschule Augsburg, 2001
- [Gebhardt 2003] **Gebhardt, A.:** *Rapid Prototyping-Werkzeuge für die schnelle Produktentwicklung*, Hanser Verlag, 2. Auflage, 2003
- [Grimm 2002] **Grimm, T.:** *Is CNC Machining really better than RP?* Report Wohlers Associates, 2002
- [Griebel 2002] **Griebel, F.:** *Eigenschaften und Verarbeitung von thermoplastischen Kunststoffen für die Orthopädie-Technik*, Orthopädie-Technik 3/02 S., 2002
- [Hastrich 2000] **Hastrich, M.:** *Analyse der Produktentwicklung am TM 21 aus technischer Sicht*, Diplomarbeit, Institut für Prozess- und Datenmanagement, Produktionstechnologie und Produktentwicklung, Universität Duisburg-Essen, 2000
- [Hopkins et al. 2000] **Hopkins, L.M.; Kelly, J.T.; Wexler, A.S.; Prasad, A.K.:** *Particle image velocimetry measurements in complex geometries*, Experiments in fluids 29 (2000) 91-95, 2000
- [ipt 2005] www.ipt.fraunhofer.de/
- [Jaeger et al. 2003] **Jaeger, H.; Levy, G.N.; Schindel, R.:** *New Trends and Application in Rapid Prototyping Technologies*, Proceedings of IE&EM'2003 2003 International Conference of Industrial Engineering and Engineering Management: Global Industrial Engineering in e-century, Aug. 6-8, 2003. Shanghai, P. R. China
- [Keck et al. 2000] **Keck, T.; Leiacker, R.; Schick, M.; Rettinger, G.; Kühnemann, S.:** *Temperatur- und Feuchteprofil der Nasenwege vor und nach Schleimhautabschwellung durch Xylometazolin*, Laryngo-Rhino-Otol 79, 749-752, 2000

- [Kief 2005] **Kief, H.B.:** *NC/CNC Handbuch 2005/2006*, Sonderausgabe zur 25. Auflage, Hanser Verlag, 2005
- [Klueh 2005] www.plexiglas-klueh.de
- [Kim u. Chung 2004] **Kim u. Chung:** *An investigation on airflow in disordered nasal cavity and in corrected models by tomographic PIV*, Meas. Sci. Technol. 15 (2004) 1090-1096, 2004
- [Kelly et al. 2000] **Kelly, J.T.; Prasad, A.K.; Wexler, A.S.:** *Detailed flow patterns in the nasal cavity*, J Appl Physiol 89: 323-337, 2000
- [Klocke u. Kopner 2002] **Klocke, F.; Kopner, A.:** *Perspektiven der Zerspantechnik – Entwicklung und Integration der Fertigungsprozesse von morgen“* 2002
<http://idr-online.com/german/pages/archive/>
- [König 1990] **König, W.:** *Fertigungsverfahren Band 1 – Drehen, Fräsen, Bohren* Studium und Praxis – VDI Verlag, 4. Auflage, 1990
- [Lamprecht et al. 2005] **Lamprecht, J.; Montag, M.; Stolz, B.; Schatton, R.:** *Die kalorische Prüfung der Nasendynamik – MRT-Untersuchungen zur Änderung des Nasenlumens in Abhängigkeit von Temperatur und anderen Parametern*, HNO-Informationen (Kongressabstracts) 2005; 84, Thieme, 2005
- [Leopold 1999] **Leopold, J.:** *Werkzeuge für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung*, Hanser Verlag, 1999
- [Lemke 1992] **Lemke, J.:** *Fertigungsmesstechnik*, Vieweg Verlag, 2. Auflage, 1992
- [Lennings 2000] **Lennings, L.:** *Selecting either Layered Manufacturing or CNC Machining to build your Prototype*”, Delft Spline Systems, Netherland
www.deskproto.com/files/
- [Lennings 1999] **Lennings, L.:** *RP with CNC*, Delft Spline Systems, Netherland
www.deskproto.com/files/
- [Levy et al. 2003] **Levy, Gideon D.N.; Schindel, R.; Kruth J.P.:** *Rapid Manufacturing and Rapid Tooling with Layer Manufacturing (LM) Technologies, State of the Art and Future Perspectives*, CIRP Annals 2003 Volume 52/2/2003

- [Liepsch] **Liepsch, D.:** *Biofluid Mechanics – A Challenging Research Field*, Report, Institut für Biomechanik, TU München, Datum/Ort der Veröffentlichung nicht bekannt
- [Masing 1967] **Masing, H.:** *Experimentelle Untersuchungen über den Strömungsverlauf im Nasenmodell*, Arch. Klein. Exp. Ohren Nasen Kehlkopfheilkd., 189, 371-381, 1967
- [Melker 2004] **Melker, J.:** *Nasal Cavity Model to Aid Fight against Serious Nose Bleeds*, University of Florida
www.geomagic.com - 2004
- [Michaeli 1999] **Michaeli, W.:** *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*, Hanser Verlag, 4. Auflage, 1999
- [Müller M. 2002] **Müller, M.:** *Modularisierung von Produkten*, Hanser Verlag, 2002
- [Müller 2000] **Müller, D. H.:** *Experiences using Rapid Prototyping Techniques to Manufacture Sheet Metal Forming Tools*, BIBA, Universität Bremen, 2000
- [MTS 2005] www.mts-cnc.com
- [NCG 2004] www.ncg.de
- [Nursanto 2002] **Nursanto, W.:** *Anwendungen von Rapid Product Development und deren potentielle Nutzung bei konsequentem Einsatz* - Diplomarbeit
Institut für Rapid Product Development RPD, St. Gallen, Schweiz
2002
- [Paucksch 1996] **Paucksch, E.:** *Zerspantechnik*, Vieweg Verlag, 11. Auflage, 1996
- [Raab 2004] **Raab, D.:** *Untersuchung der Bearbeitungsparameter beim Fräsen transparenter Materialien für das Rapid Prototyping* - Projektarbeit
Institut für Product Engineering, Produktionstechnologie und Produktentwicklung, Universität Duisburg-Essen, 2004
- [raprotec 2006] www.reprotec.de

- [Sauer et al. 2005] **Sauer, A.; Beneke, F.; Bergers, D.; Witt, G.:** *Modelle und Prototypen für die Medizin*, RTE Journal Ausgabe 2, 2 (2005), Aachen, 2005
- [Sila 2005] www.sila-kunststoffverarbeitung.de
- [Schindel et al. 2002] **Schindel, R.; Jaeger, H.; Levy, G. N.:** *New Technologies to Shorten Time to Market: The Impact of Actual and Future Rapid Prototyping Technologies*, Report, FHS University of Applied Sciences St. Gallen, Switzerland, 2002
- [Spur u. Krause 1997] **Spur, G.; Krause, F. L.:** *Das virtuelle Produkt – Management der CAD Technik*, Hanser Verlag, 1997
- [Teksoft 2005] <http://www.teksoft.com>
- [Ticona 2005] www.ticona.com
- [Tschätsch 1991] **Tschätsch, H.:** *Handbuch spanende Formgebung*, Verfahren, Werkzeuge, Berechnung, Richtwerte, Hoppenstedt Technik Tabellen Verlag, Darmstadt, 3. Auflage, 1991
- [Valvoda et al. 2004] **Valvoda, J.T.; Gerndt, A.; Reimersdahl, T.; Bischof, C.H.:** *Virtuelle Realität in der Rhinologie – Strömungsvisualisierung in einem rhinologischen CAS-System* – Lehrstuhl für Hochleistungsrechnen, RWTH Aachen, 2004
<http://www.rwth-aachen.de/vrca>
- [VDID 2005] www.vdid.de
- [Weyers u. Sen 2004] **Weyers, B.; Sen, A.:** *Untersuchung der Brechungsindex- und Materialeigenschaften von Plexiglas für den schichtweise Aufbau von Prototypen* – Projektarbeit, Institut für Product Engineering, Produktionstechnologie und Produktentwicklung, Universität Duisburg-Essen, 2004
- [Witt 2005A] **Witt, G.:** *Fertigungstechnik*, Hanser Verlag, 2005
- [Witt 2005B] **Witt, G.:** *Grundlagen der Fertigungstechnik*, Skriptum, Institut für Product Engineering, Fertigungstechnik, Universität Duisburg-Essen, 2005

- [Wohlers 2005] **Wohlers Report:** Rapid Prototyping & Tooling State of the Industry / Annual Worldwide Progress, Wohlers Associates
- [Zhuo 2004] **Zhuo, L.:** *3D-Models in Medical Applications* - Bachelor Thesis
Institut für Product Engineering, Produktionstechnologie
und Produktentwicklung, Universität Duisburg-Essen, 2004
- [Zhuo u. He 2004] **Zhuo, L. u. He, D.:** *Influence of Milling as Rapid Prototyping Technique in Product Development* – Project Work
Institut für Product Engineering, Produktionstechnologie
und Produktentwicklung, Universität Duisburg-Essen, 2004
- [Zhu u. Xu 2003] **Zhu, T. u. Xu, Y.:** *Influence of Virtual Prototyping on Product Development in R&D* – Project Work
Institut für Product Engineering, Produktionstechnologie
und Produktentwicklung, Universität Duisburg-Essen, 2003